عناصر

صوتيات موجات الكلام

تأليف

بيتر لادفوجد

ترجمة الأستاذ الدكتور

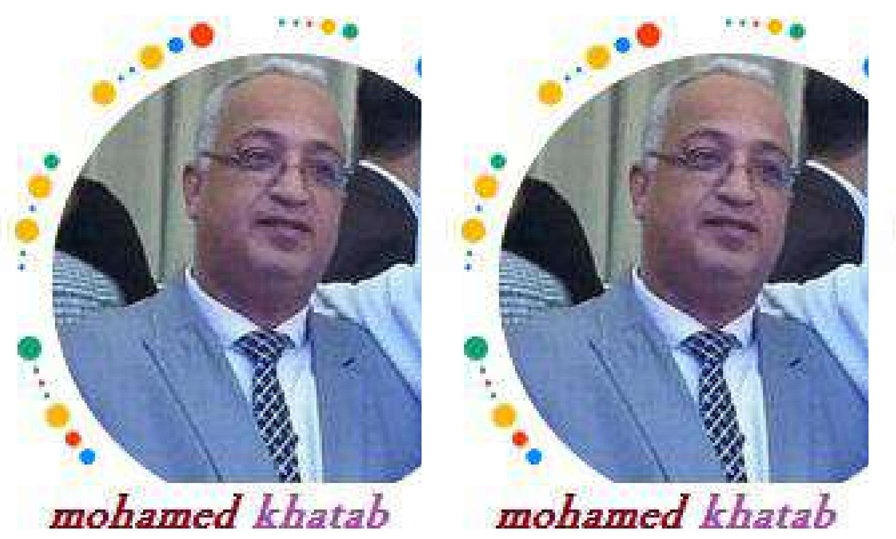
محمد العناني

عميد كلية الآداب - جامعة البتراء

دار جرير

للنشر والتوزيع

www.darjareer.com


mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

mohamed khatab

عناصر

صوتيات موجات الكلام

تأليف

بيتر لادفوجد

ترجمة

الأستاذ الدكتور محمد العناني

الطبعة الأولى

1430هـ - 2009م



عناصر صوتيات موجات الكلام.

بيتر لافوجد؛ ترجمة أ.د محمد اسحق العناني

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2008/11/3881)

رقم التصنيف : 532

الواصفات: الصوتيات/ / النطق/

الطبعة الأولى 1430هـ - 2009م

دار جرير
للنشر والتوزيع

عمّان-شارع الملك حسين- مقابل مجمع الفحيص التجاري

هاتف : 4651650 - فاكس : 4643105 6 962+

ص . ب . : 367 عمّان 11118 الأردن

www.darjareer.com- E-mail: info@darjareer.com

ردمك ISBN 978- 9957 - 38 - 134-9

محتويات الكتاب

مقدمة 7

الفصل الأول: الموجات الصوتية 13

الفصل الثاني: العلو ودرجة الصوت 27

الفصل الثالث: النوعية 37

الفصل الرابع: تحليل الموجات 51

الفصل الخامس: الرنين 73

الفصل السادس: السمع 91

الفصل السابع: إنتاج الكلام 109

الفصل الثامن: النغمات التجاوبيّة للقناة الصوتية 133

الفصل التاسع: معالجة الكلام رقميا 157

الفصل العاشر: تحليل فورير 175

الفصل الحادي عشر: المرشحات الرقمّية وتحليل LPC 207

مقدمـــة

هذه طبعة جديدة لكتاب عناصر صوتيات الموجات Elements of Acoustic Phonetics الذي قدّم، في سـبعة فصـول قصـيرة، الجوانـب الرئيسـة في صوتيـات الموجات ذات الأهمّية لدراسة الكلام . ربما كـان مـن الأفضـل أن أختـار عنـوان "عناصر صوتيات الموجات لعلماء الصـوت" بسـبب أن الطبعـة الأولى مـن الكتـاب ركزت على دراسة الموجات الصوتية بدلا من صوتياتها . والكتاب الحالي يرمي إلى نفس الأهداف . إن العناصر الأساسية للموضوع لم تتغير خلال أربعـين سـنة الـتي انقضت على كتابة النسخة الأولى، ولهذا، فإن الفصول الستة الأولى قـد تم تحديثـها بإدخال تغيـيرات بسـيطة علـى المصطلحـات وعلـى الرسـومات التوضيحيّـة الـتي رسمت بوساطة برامج حاسوبية رسما أكثر دقة . وأجريـت توسـعة علـى الفصـل السابع لنأخذ في الحسبان البحـوث الجديـدة في طبيعـة الكـلام، وأضفـت الفصـل الثامن الذي يتناول مواضيع خاصة في الصوتيات، مثـل تـرددات الرنـين في القنـاة الصوتية،وعلاقة التوافقيات بالتجاويف المختلفة . وأضفت فصولا أخرى تبحث في العناصر الجديدة التي أضيفت إلى صوتيات الموجات نتيجة لاستخدام الحواسـيب . فالفصل التاسع يوضح كيف تخزن الحواسيب الموجـات الصوتيـة وبعـض جوانـب الكلام حاسوبيا وبالنسبة للفصلين العاشر والحادي عشر فهما أكثر تعقيدا لتناولهما بشكل مفصل موضوع حوسبة الكلام، إلا أننا إذا افترضنا أن القارئ غـير ملـم إلا بالنز اليسير من رياضيات المـدارس الثانويـة، فـإن الفصلـين (10) و(11) يفسـران المعادلات التي تستخدمها الحواسيب باتباعها الطريقتين الشائعتين في تحليل أصوات الكلام وهما تحليل فورير وشيفرة التنبؤ الخطي .

لا يزال هدف الكتاب كما كان من قبل وهو إعطاء تقرير عن تلك الجوانب من صوتيات الموجات ومعالجة الكلام رقميا التي يحتاج إلى معرفتها اللغويون وعلماء الصوت، دون أن أثقل عليهم بمواد ليست بذات صلة.

وفي بعض الحالات، أدى بيّ الأمر إلى تبسيط الموضوعات زيادة عن الحد، أو التغاضي عن نقاط يجدها قراء أكثر معرفة بصوتيات الموجات لازمة و ضرورية . لقد حذفتها كي لا تثبط همة اللغويين وعلماء الصوت بالعديد من التفاصيل التقنيَة.

حصلت على قدر كبير من المساعدة في تنقيح هذا الكتاب من قبل العديد من الطلبة . كما أن زميلي بات كينج، وزميلتي عبير علوان قدما لي ملاحظات جيدة .إنني مدين بشكل خاص للسيد لويد رايس، وند نيوبورج وتوم كرستال الذين علموّني الكثير مما أعرفه عن معالجة الإشارة رقميا . اقترحوا علي طرقا جيدة لعرض هذه المادة وخلصاني من مشكلات كبرى . و كما هو الحال على الدوام، أقدم الشكر إلى زوجتي، جيني لادفوجد لصبرها وهي تقرأ العديد من مسودات الكتاب ولمساعدتها في صياغة كلمات كل فقرة من فقرات الكتاب . ومع كل هذه المساعدة، آمل أن يقدّم الكتاب تقريرا مقروءا لعناصر صوتيات الموجات ولطرق معالجة الإشارة الأساسية التي تستخدمها الحواسيب لتحليل الكلام .

* بيتر لادفوجد أستاذ برتبة "شرف" في الصوتيات في جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس، وهو مؤلف كتاب (مبادئ صوتيات علم اللغة) الذي أصدرته مطبعة جامعة شيكاغو .

I SBN: 0-226-46763-50 – 226-46764-3

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة المترجم

هذا الكتاب Elements of Acoustic Phonetics الـذي اخترت ترجمة لـه "عناصر صوتيات الموجات" كتبه أحد مدرسي الصوتيـات المشـهورين في الأوسـاط الجامعية العلميّـة وهـو الأسـتاذ بيـتر لادفوجـد، أسـتاذ الصوتيـات بجامعـة لـوس أنجلوس، وتناول فيه النواحي الأساسيّة للإشارة الصوتية، تلك الإشـارة الـتي يتـم نقلها بوسائل الاتصال الحديثة، أو يتم تسجليها على شريط ممغنط أو قرص ليزر أو يتم تخزينها بوسائل أخرى.

اشتملت الفصول الستة الأولى على مواضيـع تتعلـق بالخصـائص الفيزيائيـة للموجات الصوتية الخاصة بأصوات الكلام وتضمنت مختلف الطرق التي تمكننا من التعرف عليها وتحديدهـا عـن طريـق قيـاس تردداتـها وسـعاتها وفتراتـها الزمنيـة، وخصص المؤلف الفصلين الأول والسادس للبحث في نظام السّـمع الـذي يـترجم الإشارات الصوتية إلى إشـارات عصبيّـة. وتركـزت الدراسـة في الفصلـين السـابع والثامن على بيان العلاقـة بـين الـترددات التوافقيـة لأصـوات الكـلام والأوضـاع النسبيّة التي تتخذهـا أعضـاء النطـق أثنـاء الكـلام، أمـا الفصـول الثلاثـة الأخـيرة فخصصت لتقديم معلومات عن برامـج الحاسـوب المستخدمة في تحليـل إشـارات أصوات اللغـة وأهمـها برنـامج الـترميز الخطـي التنبـؤي LPC وتحويـلات فوريـر السريعة FFTs .

تكتسب ترجمة هذا الكتاب إلى اللغة العربيّـة أهميّـة خاصّـة لأسـباب كثـيرة

نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر الاهتمام الكبير في مراكز البحوث العلميّة بموضوع "تكنولوجيا الكلام" وهي عبارة استحدثت للدلالة على الوسائل الاصطناعيّة التي من شأنها مساندة مهارات الاتصال وتعزيز وظائفها، ومن ثمرات هذا الاهتمام،نخص بالذكر، اختراع الهاتف والمعينات السمعيّة، وآلات الاستجابة المرافقة للهواتف، وآلات معالجة النصوص، وغيرها.

وقديما، كانت مواضيع "الكلام" تنال قسطا وافرا من اهتمامات اللغويين العرب، نورد هنا على سبيل المثال مشتقات اللفظة كلمة واستعمالاتها كما وردت في كتاب المخصص لابن سيدة (السفر الثاني، ص 207) "الكلام - القول، والكلِمة اللفظة وجمعها كَلِمٌ وهي الكَلْمة، وجمعها كَلْم. تكلّم الرجل وكالَمته مُكالمة وكَلّمتُه تكليماً، الرجلان لا يتكالمان ولا يقال لا يتكلّمان: كليمك الذي يكالمك. رجل كِلْمانيٌّ وتكلّماة وتكلام".

ولكي أسلّط الأضواء على هذا الجانب من دراسة أصوات اللغة، قمت بترجمة هذا الكتاب لأقدّم للقارئ العربي معلومات مضبوطة سهلة القراءة وإن كانت لا تخلو من المصطلحات العلميّة التي لا غنى عنها في أي مادّة علميّة.

وفي الختام أتقدّم بالشكر والعرفان إلى الطالبتين هبة الله عواد وماجدة عمران عبد المجيد لمساعدتهما في طباعة الكتاب، ولزوجتي التي كانت ولا تزال ساعدي الأيمن في إنجاز كل عمل أكاديمي مهما كان.

أ.د. محمد العناني

الفصل الأول

الموجات الصوتية

الفصل الأول

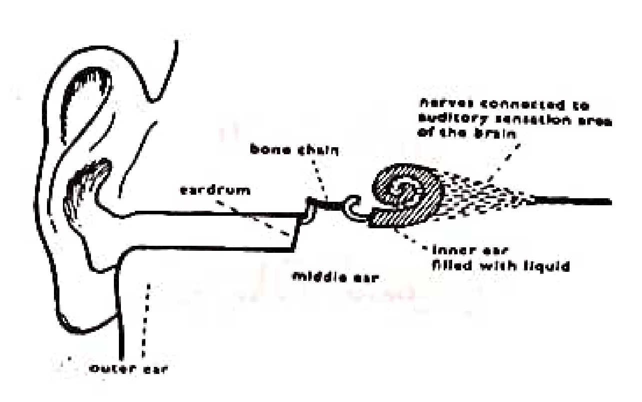
الموجات الصوتية

إن إحدى أهم الصعوبات التي تجابهنا عند دراسة الكلام هي أن الأصوات عرضة للزوال والتلاشي، فما إن نتفوه بكلمة حتى تتوقف عن الوجود تماما، صحيح أننا نتذكر الأصوات إما عن طريق تكرار الكلمات أو باستعمال شكل من أشكال التسجيل الصوتي لها، إلا أننا في كلتا الحالتين نشهد حدثا آخر، هذا الحدث الذي نشهده ما هو إلاّ نسخة عن الصوت الأصلي وليس بأي حال الصوت ذاته.

إن الأمر يثير الدهشة حقا أننا نجد صعوبة في وصف الصوت حتى في أثناء تواجده القصير بيننا، فنحن لا نرى شيئا، ولا نجد حلقة وصل يمكن مشاهدتها بالعين المجردة تربط بين المتكلم والمستمع، هناك هواء يحيط بهما، إلاّ أنه من غير الممكن أن نرى أي تغيرات في حالة الهواء حين انتقال الصوت من خلاله.

ونظرا لهذه الصعوبات، فلعل أفضل طريقة للبدء في دراستنا للصوت هي بدراسة مقتضبة للأذن البشرية، وبهذه الطريقة نبدأ بشيء ملموس، لأننا ندرك بأن الأذن هي عضو السمع، ومع أن هناك بعض الشكوك حول الآلية التي تعمل بها الأذن، إلاّ أننا مع ذلك نستطيع أن نفسر عددا من الحقائق حول طبيعة الصوت وفقا لمبادئ نظرية مبسطة.

يوضح الشكل 1-1 الملامح الرئيسة للأذن، وأول جزء نلاحظه هو طبلة الأذن، وهي عبارة عن غشاء رقيق يوجد على مسافة بوصة واحدة أسفل الممر الضيق، أو ما يسمّى بالممر السّمعي المتصل بالأذن الخارجية، وعندما يدفع الهواء أسفل الممر السمعي، تميل طبلة الأذن للتحرك معه، ثم لا تلبث أن تتحرك إلى الخلف بعد أن يخرج الهواء.



شكل 1-1 رسم توضيحي يمثل تقلبات في ضغط الهواء

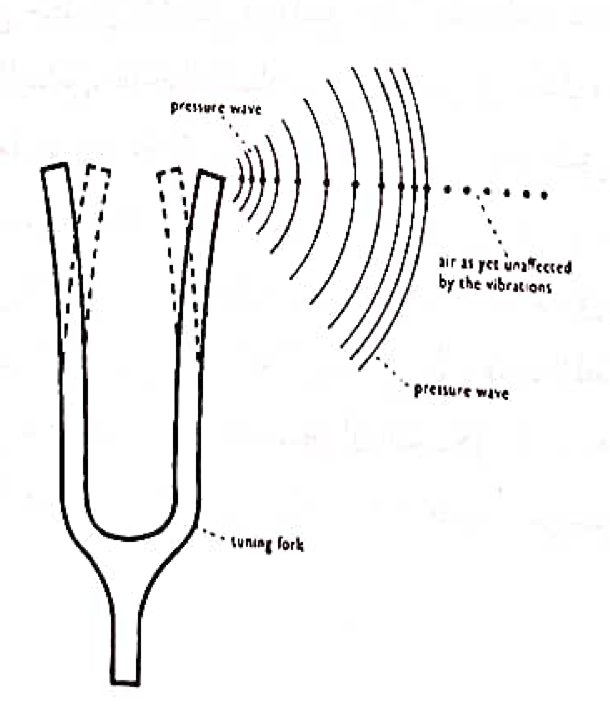
يتصل بطبلة الأذن سلسلة من العظام تقوم بوظيفة نقل حركات طبلة الأذن إلى السائل بداخل الأذن الداخلية، ومن خلال عمل سلسلة العظام، فإن اهتزازات طبلة الأذن إلى الأمام و إلى الخلف تسبب اهتزازات في السائل، ويرتبط بهذا السائل الأعصاب التي تصل إلى المنطقة الحسية الخاصة بالسّمع من الدماغ، إن حركات هذا السائل تحفز الأعصاب، وهكذا فإننا نخوض تجربة الإحساس بالسّمع. وعلى وجه الإجمال، إذن، يمكننا القول بأن الصوت هو اضطراب في الهواء يؤدي إلى زحزحة في طبلة الأذن التي تقوم بدورها، بعد أن ينتقل الصوت من سلسلة العظام، بالتأثير على السائل الموجود في الأذن الداخلية، الأمر الذي يؤدي إلى حفز الأعصاب السمعية. إن دراستنا لطبيعة الصّوت ستظل مرتبطة باضطرابات الهواء التي تبديء هذه العملية.

لو حوّلنا انتباهنا الآن إلى دراسة مصادر الأصوات المختلفة لوجدنا أن مصدر الصوت في كل حالة يتضمن شكلاً من أشكال الحركة، فأنت تسمع ضجيجا عندما يرتطم كتاب على الأرض بعد سقوطه، كما أن البيانو والكمان لهما أوتار تهتز، وأضف إلى ذلك أن معظم أصوات الكلام تنشأ عن حركة الهواء المنبعث من الرئتين. إن هذه الحركات هي التي تحدث اضطرابات في الهواء المحيط، وتجدر الإشارة إلى أن هذه الحركات لا تحدث في آن واحد وبشكل فوري في منطقة الهواء المحيط بمصدر الصوت بل إنها تنتشر متباعدة عن المصدر كانتشار الموجات على صفحة الماء، وعليه، فلابدّ أن نأخذ في الحسبان فترة التأخير ابتداء من اللحظة التي تسببت فيها الحركة الأصلية أول اضطراب إلى اللحظة التي يصل عندها أول اضطراب لأذاننا. فالصوت

ينتقل بسرعة كبيرة جدا، ولهذا فإننا عندما نشاهد أحد الأشخاص وهو يتكلم، فإننا نسمع الأصوات في نفس الوقت الذي نرى فيه الحركات التي سببتها.

ولكي نفسر هذه الظاهرة، فإننا لجد أنه من المناسب أن نتصور الهواء الموجود بين آذاننا ومصدر للصوت وكأنه مقسم إلى عدد من الجزيئات. إن مصدر الصوت يسبب حركات في جزيئات الهواء في المحيط المجاور مباشرة له وهذه الحركات تسبب بدورها اضطرابات في الهواء في منطقة تبعد قليلا عن مصدر الصوت، ثم تقوم جزئيات الهواء تلك بالتأثير على جزيئات أخرى بجوارها، وهكذا فإن الاضطراب ينتشر بعيدا عن المصدر شيئا فشيئا.

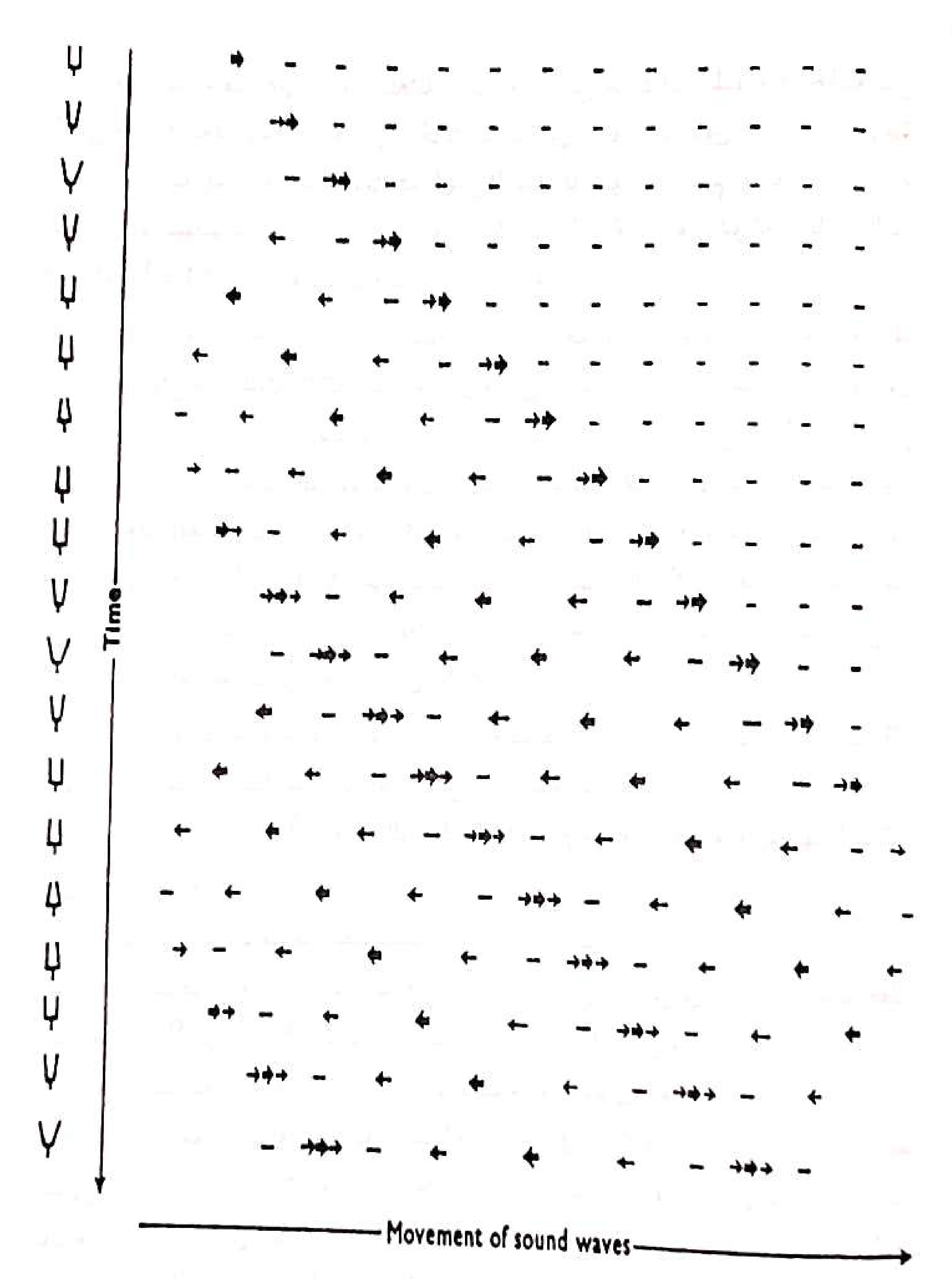
سنبدأ بدراستنا المفصلة لإنتاج الصّوت بالتركيز على دراسة نغمة صادرة عن شوكة رنانة. إنك حينما تدقق النظر في شوكة رنانة وهي تطلق رنينها، ستجد أن طرفي الشوكة غير واضحة للعيان، ويعود السبب في ذلك لاهتزازها بسرعة من جانب لآخر. إن هذه الحركة التي تراها بشكل مكبّر في الشكل1-2تقوم بعمل سلسلة من الضربات على الهواء المجاور.



شكل 1-2 رسم توضيحي يمثل تقلبات في ضغط الهواء سبّبها شوكة رنانة مهتزة.

يمثل الشكل 1- 2لحظة الحركة لأقصى مدى يبلغه الطرف الأيمن من الشوكة الرنانة، وفي تلك اللحظة تكون جزيئات الهواء المجاورة مباشرة للشوكة الرنانة قد تحركت لتصل الآن إلى وضع جديد مجاور لجزيئات الهواء الأخرى، وحينما تقترب جزيئات الهواء بعضها من بعض، يضغط الهواء، وحينما تبتعد جزيئات الهواء عن بعضها، تتكون منطقة تعرف باسم منطقة التخلخل rarefaction وفيما بعد، أي بعد مرور لحظة أخرى يعود الهواء من جديد إلى سابق وضعه بحيث تتكون منطقة من التخلخل حول الشوكة الرنانة. وهكذا نعرف الآن بأن الهواء المحيط بالشوكة الرنانة المهتزة يتضاغط حينا ويتخلخل حينا آخر، ونعلم أيضا أن اضطراب الهواء حول الشوكة يؤثر على جزيئات الهواء المتواجدة على مسافة قريبة منها، الأمر الذي يؤدي إلى إحداث زحزحة فيها حتى تصل هذه الزحزحة إلى أذن المستمع فتتحرك تبعا لذلك طبلة الأذن، وفي نهاية الأمر ندرك هذه الحركة كصوت من الأصوات.

ولنأخذ صورة أوضح عن سلوك الهواء، لندرس حركة عدد من جزيئات الهواء، ويوضح الشكل 1-3حركة ثلاثة عشر جزئ من جزيئات الهواء (بشكل مبسط إلى حد ما) ويوضح كل خط في الشكل مواضع هذه الجزيئات بعد فترة وجيزة من اللحظة الممثلة في الخط السابق، فالخط السادس، على سبيل المثال، يمثل المواضع التي تشغلها هذه الجزيئات بعد مرور لحظة على شغلها المواضع التي يدل عليها الخط الخامس. ويوضح هذا الشكل الجزئيات الساكنة التي مثلنا لها بشرطة (-)، وحينما يتحرك الجزيء ندل على ذلك بسهم، أما بالنسبة لمقدار السّرعة في الحركة فندل عليها بسهم أكثر سوادا، وبالنسبة لمواضع الشوكة الرنانة في الأوقات المطابقة لتلك المواضع فتظهر على يسار الشكل من المهم أن نلاحظ أن الشكل 1-3 هو نوع من أنواع المخططات ولا يمثل بتاتا كما هو الحال في شكل 1-2 صورة مرسومة



شكل 1-3 انتشار الموجة الصوتية.

يدل كل سطر على موقع الثلاثة عشر جزيئاً من جزيئات الهواء في لحظة من الزمن و ذلك بعد مرور لحظة على الجزيئات التي في السطر السابق. و تدل الشرطة على الجزيئات الساكنة، أما الجزيئات المتحركة فأشرنا إليها بالأسهم، مع مراعاة أنه كلما ازداد السهم سمكاً ازدادت سرعة الحركة. و بالنسبة لمواقع الشوكة الرنانة التي قد تكون أحدثت هذه الحركات فتظهر على الجهة اليسرى.

لحدث من الأحداث، فهو لا يمثل ما يحدث لكمّية من الهواء حين طرق شوكة رنانة، بل يمثل ما يحدث لثلاثة عشر جزيء من جزيئات الهواء ليس غير، ويبين المواضع المتتالية لهذه الجزيئات على شكل خطوط متتابعة، ولأن كل خط منها يمثل لحظة زمنية جاءت بعد لحظة سابقة فإن دراستنا للشكل يجب أن تتم بحيث ندرس خطا واحدا فقط في كل مرّة. وقد يكون من المناسب أن نبدأ بوضع ورقة على الشكل بحيث نرى الخط الأعلى في كل مرة ليس غير، وحينما نحرّك الورقة باتجاه أسفل الصفحة، تظهر أمامنا مناطق التضاغط والتخلخل باتجاه اليمين، على الرغم من أن جزيئات الهواء تتحرك إلى الخلف وإلى الأمام.

إن هذه الظاهرة تعرف بالموجة، ومن خصائص حركة الموجة الرئيسة أن الطاقة، على شكل مناطق تضاغط وتخلخل، تنقل عبر مسافات طويلة من خلال وسط ناقل كالهواء، على الرغم من أن أجزاء الوسط لا تتزحزح من مكانها أو وضعها الساكن التي هي عليه إلا قليلاً.

ولكي ندرك بالضبط كيف تنتقل حركة موجة من الموجات، علينا أن ندرس بشيء من التفصيل ما يدل عليه الشكل 1-3 ، إننا حين نتمعّن في الشكل خطاً خطاً الواحد تلو الآخر، نرى أن طرفي الشوكة الرنانة تتحركان بسرعة إلى الخارج من خلال مواضعها الساكنة، ويلاحظ أن جميع الجزيئات ساكنة سوى الجزيء الأول منها والذي يتحرّك تجاوباً مع الشوكة الرنانة، ونشاهد تباطأ في حركة الجزيء الأول في الخط الثاني الذي يمثل ما يحدث بعد مرور لحظة أخرى عندما يدفع جزيء آخر، ويبدأ بالتحرك بسرعة. وفي السطر الثالث (وبعد مرور لحظة أخرى) يبدأ الجزيء الأول باتخاذ وضع السكون، ويبدأ الجزئي الثاني بالتباطؤ بعد أن تسبب في حركة الجزيء

الثالث، أما في السطر الرابع فإن الجزيء الثالث لا يزال يتحرك إلى الخارج ثم يأتي دور الجزيء الرابع فيشرع بالحركة، في حين أننا نجد في نفس الوقت أن الجزئي الثاني قد توقف، وأن الجزئي الأول بدأ يتحرك إلى الخلف باتجاه الشوكة الرنانة التي بدأ طرفاها بالتحرك أحدهما تجاه الآخر.

إن سلوك كل جزيء يشبه إلى حد كبير سلوك كرة البندول، فلو دفعت رقاصا دفعة واحدة بحيث يتحرك إلى أحد الجوانب، فسيتحرك مسافة معّينة ثم لا يلبث أن يتأرجح عائدا إلى وضعه الساكن، وبنفس الطريقة، فإن حركة كل جزئي شبيهة بالرقاص حيث يتلقى الجزئي دفعة من الجزئي المجاور له،فالجزيء السابع يتلقى حركته من الجزئي السادس، ويشرع الجزئي السادس بالحركة نتيجة دفعة يتلقاها من الجزيء الخامس، وهكذا دواليك.

وبهذه الطريقة يتم انتقال الحركة الاهتزازية عبر الهواء، وتتحرك الجزيئات جيئة وذهابا بينما تبتعد أمواج التضاغط شيئا فشيئا، ونتيجة لذلك، فإن الأذن الصاغية ستحسّ بلحظات من الضغط المتزايد يتبعها لحظات من ضغط آخذ في النقصان، الأمر الذي يؤثر على طبلة الأذن، كما أسلفنا، بحيث يتولد عندنا في النهاية إحساس بالصوت.

إننا لا نحسّ بجميع أنواع التفاوت في ضغوط الهواء كأصوات، فعلى سبيل المثال، نستطيع أن نولد بواسطة مروحة موجة هواء تصحبها موجة ضغط يمكن الإحساس بها ولكن لا يمكن سماعها، وفي هذه الحالة يتولد عندنا بالتأكيد اضطراب في الهواء، إلاّ أن هذا الاضطراب لا يمكن للأذن أن تحس به، لأن إحساسنا بالصوت لا ينتج إلاّ من خلال تغيرات سريعة متعاقبة في ضغط الهواء.

إن أي تغير مناسب في ضغط الهواء نعتبره مصدرا من مصادر الصّوت، وكما رأينا، فإن التغيرات في ضغط الهواء تنتج عن حركات صغيرة لكنها متكررة في جزيئات الهواء، ونشأت هذه الحركات بالطبع لأن مصدر الصوت يحدث حركات مشابهة، وهذه الحركات عادة فائقة السرعة لدرجة أننا لا نراها بالعين المجردة، إلا أنك إذا وضعت إصبعك بخفة على طرف شوكة آخذة في الرنين، فإنك غالبا ما ستشعر

بالاهتزازات وقد تتوقف الحركة بسبب ضغط إصبعك، وبالتالي فإن الصوت سيتوقف تبعا لذلك، وبنفس الطريقة فـإنك قـد توقـف اهـتزاز كـأس ينبعـث منـه صـوت إذا وضعت يدك عليه. إن الكأس والشوكة الرنانة كلتيهما مصدران من مصادر الصـوت طالما أنهما في حالة اهتزاز.

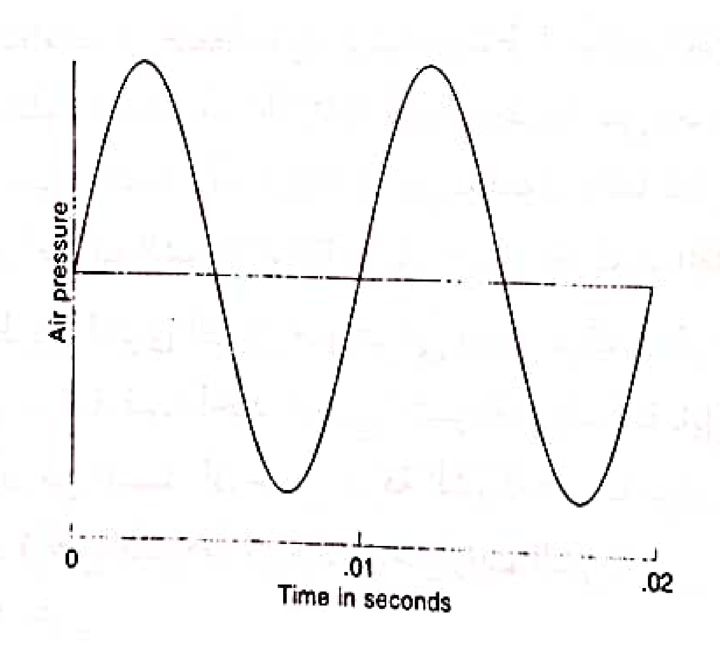
ونورد أيضا ذكر مصدر بسيط آخر من مصادر الصـوت وهـو الوتـر المشـدود، عندما نجذبه أو ندفعه إلى أحد الجوانـب ثـم نتركـه، فسيقفز راجعـا ومتخطيـا وضـع السّكون الأصلي الذي كان عليه، ثم يشرع بالاهتزاز، وهذا هو المبدأ الأساسي الـذي تعمل عليه بعض الآلات الموسيقية كالقيثارة و العود والكمان، وكذلك البيـانو الـذي يحتوي على أوتار مشدودة أو أسلاك يتم ضربها بمطارق صغيرة بدلا مـن جذبـها أو دفعها جانبا، إن اهتزازات جميع الآلات ذات الأوتار المشـدودة يتـم نقلـها في الغـالب من خلال جسر إلى لوحة من نوع معين تصبح فيما بعد مصدرا من مصادر الصوت.

إن بعض مصادر الصوت لا يحدث اهتزازات منتظمـة في الهـواء، فعلـى سـبيل المثال، عندما يرتطم كتاب ساقط بالأرض، نسـمع ضجيجـا، علـى الرغـم مـن عـدم وجود أي شيء من قبيل ما ذكرناه كالوتر المشدود أو شـوكة رنانـة مـهتزة، فـالصوت الذي سمعناه حصل نتيجة تضاغط مفاجئ للهواء أسفل الكتاب مـن ناحيـة، ونتيجـة لحركات غير منتظمة شتى حدثت في الكتاب والأرض على حد سواء.

إن مصدر الصوت الذي يحظى باهتمامنا الرئيسي هو الصـوت البشـري، وهنـا نجد أن التغيرات في ضغط الهواء تحـدث بوسـائل متنوعـة، وأهـم هـذه الوسـائل هـو انفتاح الأوتار الصوتية وإغلاقها السريع، ففي كل مرّة نغلـق فيـها الأوتـار الصوتيـة، ينشأ ضغط لا يلبث أن يزول بعد فتحها، ويتكـون نتيجـة لانفتـاح الأوتـار الصوتيـة وإغلاقها السريع سلسلة من التفاوت الكبير في ضغط الهواء، وكما سنرى في الفصـل السابع لاحقا، فإن هذه التغيرات في ضغط الهواء تؤثر على الهواء الموجود في الحنجـرة والفم بطريقة يتم تبعاً لهذه التغيرات إحداث أصوات الكلام.

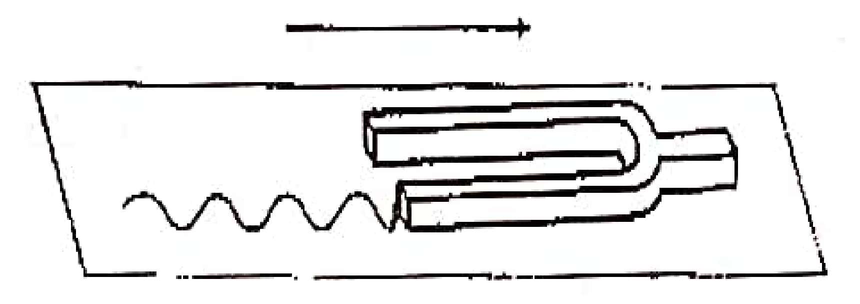
وفي بحثنا عن الأصوات، من المفيـد أن يكـون لدينـا بعـض الوسـائل لتمثيلـها بأشكال نراها، وهذه الضرورة التي يمليها علينا البحث تجعلنـا ميـالين لصـرف بعـض

الوقت لدراسة مبادئ رسم الأشكال. في الفقرات السابقة، أمضينا بعض الوقت في وصف الأصوات، وفقا لحركات الهواء، وكذلك بالنسبة للتفاوت في ضغط الهواء. إن مشكلتنا الآن تكمن في إيجاد طريقة مناسبة لتمثيل هذه الحركات والضغوطات، وما نحتاج إليه هو شيء حسّاس قادر على تمثيل التغيرات الصغيرة في الضغط أو لحركات الهواء. فالميكروفون مثلا جهاز يولّد تغيرا في الفولتية الكهربائية، وهذا التغير يتناسب تماما مع التغيرات في ضغط الهواء المحيط. وبمساعدة الميكروفون نستطيع أن نشكل رسما (أنظر الشكل 1-4) يدل على التفاوت في ضغوطات الهواء، والتي تحدث خلال طرقنا لشوكة رنانة، وفي هذه الحالة فإن هذه التغيرات تحدث بسرعة فائقة جدا، فيرتفع الضغط ارتفاعا طبيعيا إلى أن يبلغ الحد الأقصى ثم لا يلبث أن يعود تدريجيا إلى حده الأدنى، قبل أن يبدأ بالارتفاع في جزء بسيط من الثانية. ويمثل ارتفاع أي نقطة على المنحنى فوق خط الوسط زيادة الضغط في ذلك الوقت في حين تمثل النقاط أسفل الخط المذكور ضغوطات الهواء تحت المستوى الاعتيادي للهواء المحيط.



شكل 1-4 التغيرات في ضغط الهواء خلال تصويت شوكة رنانة.

يتضح لنا من الشكل 1-4 أولا مدى أقصى حد للزيادة في ضغط الهواء، وثانيا معدّل السرعة التي تحدث فيها القمم القصوى للضغط (وفي هذه الحالة قمة واحدة في كل 1/ 100 من الثانية)، وثالثا، الطريقة التي يتم من خلالها بناء الضغط ثم تلاشيه، ومن هنا ترى أن الشكل 1-4 هو شكل مفيد للصوت من حيث أنه يمثل أهم الجوانب للموجة الصوتية.



شكل 1-5

شوكة رنانة على طبق من ورق توضح اهتزازات أحد فرعيها (الرسم مبالغ فيه)

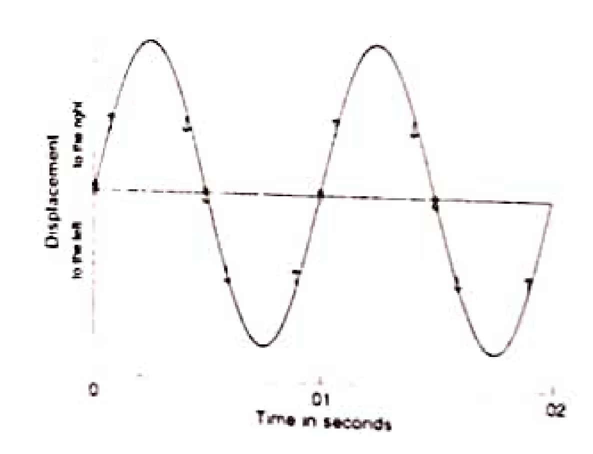
إن الاختلافات في ضغط الهواء ترتبط ارتباطا مباشرا بجزيئات الهواء، فقمم الضغط تحدث كلما كانت هذه الجزيئات قريبة بعضها من بعض، وتحدث لحظات ضغوط متدنية حينما تبتعد هذه الجزيئات عن بعضها، وكما ذكرت سالفا، فإن حركة رأس طرف من أطراف الشوكة الرنانة تقابل حركة الجزيئات المجاورة.

وهناك طريقة أخرى لتمثيل صوت هي رسم حركات ذرات الهواء. كما ذكرت في السابق، إن حركة قمة أحد فرعي الشوكة الرنانة تقابل حركة ذرات الهواء المتجاورة. والآن من السهل أن نجعل حركة الشوكة الرنانة مرئية حينما نضع رأساً مدبباً على أحد فرعي الشوكة، ثم نرسم اهتزازات الشوكة على طبق من ورق بسرعة ثابتة. (شكل 1-5).

وهناك طريقة عملية أخرى لإجراء هذه التجربة تتلخص في أن تثبت الشوكة الرنانة المهتزة على طبق من ورق ملفوف حول طبلة تدور بسرعة ثابتة. وفي جميع الأحوال سيرتسم عندنا منحنى على نحو ما نراه في الشكل.

إذا نظرنا مرة أخرى إلى الشكل 1-3، نرى أن بالإمكان إنشاء منحنى بالرجوع إلى حركة ذرة الهواء. ففي الشكل 1-3 نرى بأن موقع كل جزئي يحدث في فترات زمنية منتظمة. وبالتالي، فإن المنحنى المرسوم لمواقع الجزئيات يبين مقدار الزحزحة من وضع السكون في أي وقت من الأوقات. وهذه الطريقة من أهم الطرق المعروفة لتمثيل الصوت.

ويوضح الشكل 1-6مثالاً استخدمنا فيه الأسهم في شكل 1-3، واحتفظنا بالخط الأفقي ليمثل مقياس الزمن. حينما يكون المنحنى فوق الخط، فهذا يعني بأن جزئي الهواء قد تزحزح تجاه مصدر الصوت (أي إلى اليسار). ويجب أن نلاحظ أيضاً بأن الجزئيات ساكنة للحظة قصيرة من الزمن عند النقطة التي تتزحزح فيها الجزيئات إلى أقصى حد ممكن، وبأنها تتحرك بأسرع ما يمكن وهي تمر على موضعها الأصلي. وعموماً، فسنعتبر الأصوات في هذا الكتاب تغيرات واختلافات في الضغط. وعليه فإن أفضل شكل هو الشكل الذي يبين كيف يتغير ضغط الهواء في موضع معين خلال فترة معينة من الزمن (كما في الشكل 1-4)



شكل 1-6 حركة جزئ هواء خلال طرق شوكةٍ رنانة.

ويجب أن نتذكر، على أي حال، أنه من الممكن رسم شكل لنفس الظاهرة عن طريق بيان حركة جزئيات الهواء. الواحد منها تلو الآخر. إن هذين الشكلين يمثلان طريقتين مختلفتين للنظر إلى الشيء ذاته.

الفصل الثاني

العلو و درجة الصوت

الفصل الثاني

العلو ودرجة الصوت

عندما تسمع عددا من النغمات الموسيقية كتلك التي تحدث بواسطة شوكة رنانة، أو بيانو أو كمان، فإنك ستجد بأنها قد تختلف من خلال ثلاث نقاط رئيسية:-

أولا : قد تكون إحداها أشد من الأخرى، فإذا طرقت شوكتين رنانتين متشابهتين واحدة بهدوء والثانية بشدة أكثر بصورة ما، غالبا يكون الاختلاف الوحيد بين الصوتين الناتجين في أن أحدهما سيكون ضعيفا وبالكاد يسمع، بينما الآخر يكون عاليا ويمكن سماعه عن بعد.

أما الاختلاف الثاني المحتمل بين صوتين موسيقيين يتمثل في أن أحدهما قد يكون أعلى من الآخر من حيث درجة الصوت. وهذا هو الاختلاف الرئيسي بين نغمتين كـ(c) في الوسط و (c) في الأعلى في سلم البيانو. إنه من الممكن أن نطرقهما بحيث تبدوان متساويتين في علو الصوت ولكنهما تختلفان كصوتين لأن أحدهما أعلى في السلّم الموسيقي من الآخر. وأخيرا، فالاختلاف الثالث بين صوتين موسيقيين هو الاختلاف في النوعية، فقد تختلف نوعية صوت عن الآخر. وهذا هو الاختلاف بين نغمتين متساويتين في علو الصوت ودرجته، لكن كلا منهما قد تم إحداثها بواسطة آلات مختلفة كآلة البيانو و آلة الكمان.

هذه العوامل الثلاثة : العلو، والدرجة، والنوعية تشكل الطريقة الأكثر إقناعا في التمييز بين جميع الأصوات. ويمكن اعتبارها ثلاث وسائل يمكن للأصوات أن تختلف من خلالها. فمتى تسمع صوتين من الممكن وصف الفوارق بينهما بمقارنتهما من حيث هذه النواحي. على سبيل المثال، إن شوكة رنانة وآلة اورغ ستحدثان أصواتا

نسمعها تختلف على الأقل في اثنتين من هذه الطرق. فالأصوات التي تحدثانها يمكن أن يكون لها نفس درجة الصوت (Pitch) ولكن أحدهما غالبا لا بل من المؤكد أن يكون أكثر جهارة وأقوى قدرة على الأسماع من الثاني (Louder)، وكل صوت بلا ريب له نوعيته (Quality) الخاصة به. من ناحية أخرى، عندما نسمع الكلمتين (bad) و (bed) فمن الممكن أنهما قيلتا بنفس النغمة و العلو. في هذه الحالة فإنهما تختلفان من وجه واحد فقط ألا وهو النوعية. واحد من أهم أهداف هذا الكتاب إتاحة طريقة للحديث عن الأصوات من خلال تقديم وصف فيزيائي لتغيرات ضغط الهواء بحيث تكون منسجمة مع هذه الفوارق. بالنسبة للمتبقي من هذا الفصل سوف ندرس بتمعن الاختلافين الأبسط وهما العلو و درجة الصوت، ونرى ما إذا كان بمقدورنا أن نكتشف الظروف المختلفة للهواء المطابقة لكل منهما.

إنه لمن السهل تماما أن ندرك كيف تختلف الأصوات في علوها. إذا طرقنا شوكة رنانة بشدة فإن فرعيها يبدآن بإحداث اهتزازات كبيرة والتي إذا ما تضاءل الصوت تصبح أصغر فأصغر تدريجيا. يشابه ذلك، أنك تحدث ضجيجا عاليا بنقرك وترا أو عزفك نغمات على آلة البيانو بقوة. وهكذا فإنه من المعقول أن نفترض بأن حركة كبيرة من مصدر الصوت تنتج صوتا مرتفعا. وبأن حركة صغيرة تنتج صوتا خفيضا. إذا اعتبرنا هذا من وجهة نظر اهتزازات الهواء نرى بأن حركة كبيرة من المصدر تحدث حركة كبيرة في جزئيات الهواء أو أن نعتبر الصوت مؤلفا من تغيرات في ضغط الهواء وأن حركة كبيرة للمصدر تسبب تغيرات كبيرة في ضغط الهواء. ومن وجهة نظر المستمع، هذه التغيرات الكبيرة في ضغط الهواء تسبب حركة ضخمة مطابقة في غشاء الطبلة ومن ثم تفهم على أنها أصوات عالية.

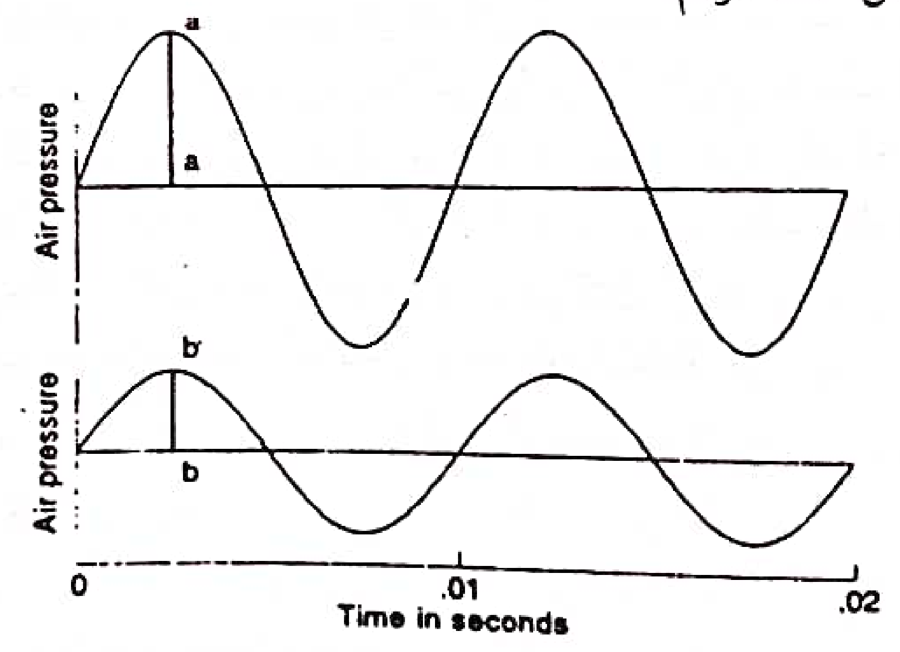
طريقتنا في تمثيل الأصوات بيانيا هي عرض كيفية تزايد وتناقص ضغط الهواء. بمقدورنا الآن أن نرى كيف يمكن أن نمثل بيانيا الفارق بين صوتين. الشكل 2-1رسم بياني لصوتين، كون أحدهما صوت عال حيث تكون التغيرات في ضغط الهواء كبيرة، في حين أن الصوت الآخر خفيض حيث تكون التغيرات في ضغط الهواء أصغر بكثير.

الشكل 2-2 رسم بياني (مبالغ فيه نوعا ما) للتغيرات في الضغط المصاحبة

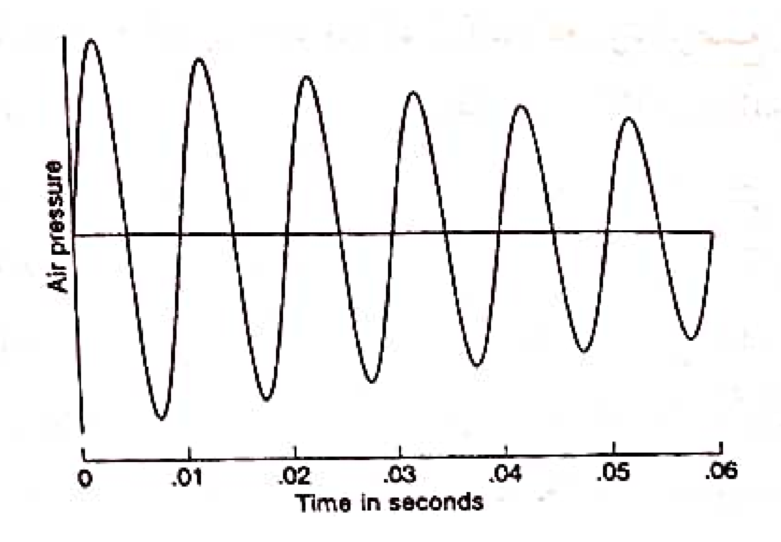
لشوكة رنانة والتي طرقت بعنف إلى حد ما، ثم تركت لتعود لوضع السكون فورا. وبعد أن طرقت الشوكة فالتغيرات الناتجة في ضغط الهواء تناقصت تدريجيا.

أن الحد الأقصى لتغير ضغط الهواء من الوضع الاعتيادي خلال إحداث الصوت يدعى سعة ذلك الصوت أو بعبارة أخرى اتساعه. في الشكل 2-1 الخطوط (a-a` ) و ( b-b`) تمثل السعتين للصوتين. وكما ترى في هذه الحالة أحدهما ضعف الآخر، ولأن سعة أحدهما أكبر من الأخرى، فالصوت الأول أكثر علوا من الاخر. ولكن وفقا لطبيعة الصوت وتركيب آذاننا لا نعتبر الصوت الواحد ضعف علو الآخر. وسنعالج في الفصل السادس تفاصيل العلاقة بين السعة والعلو. أما في هذا الفصل فسنكتفي بملاحظة أن سعة الصوت إذا ما تناقصت (بمعنى إذا أصبحت قمم الضغط طول فترة الصوت أضعف)، فإن الصوت يصبح أقل علوا .

إن أذن الإنسان حساسة جدا للتغيرات في ضغط الهواء. بالنسبة لأكثر الأصوات خفوتاً تستجيب الأذن لأصوات يتفاوت ضغط الهواء بجانب طبلة الأذن نحو جزء واحد من10,000,000,000 ، لكن فيما يتعلق بأكثر الأصوات علوا، و التي بمقدورنا سماعها بدون الشعور بألم في آذاننا يمكن أن يتفاوت الضغط نحو أكثر من مليون مرة من ذلك الرقم.



شكل 2- 1 صوتان سعة أحدهما ضعف الاخر



شكل 2- 2 شكل (مبالغ فيه إلى حد ما) لجزء من صوت تحدثه شوكة رنانة طرقت ثم عادت بالتدريج إلى وضع السكون.

إن الفوارق في الضغط حالة الهواء نتيجة للأصوات العالية والخافتة هي بقدر ما يمكن أن نتوقع لها. نحن نعلم بأن علينا أن نستخدم طاقة أكبر عند إحداث ضجيج عال بخلاف إحداث آخر خافتاً. إننا لا نستغرب حدوث اضطراب كبير في الهواء عندما يكون الضجيج عاليا، وبالتالي حدوث حركة أكبر لغشاء الطبلة. على كل حال هنالك نقطة يجب أن ننتبه لها : فلكي ننشئ تغيرات أكبر في ضغط الهواء، فأن على جزيئات الهواء أن تتحرك إلى مسافة أبعد وبسرعة أكبر. ولكن هذا لا يعني أن قمم الضغط يجب أن تكون متكررة الحدوث كما ترى في الشكل2-1، على الرغم من أن أحد الصوتين له ضعف سعة الآخر، فإن قمم الضغط لكليهما لا زالت تحدث بنفس المعدَل مرَة كل واحد على مائة من الثانية.وقد تحدث إحدى الشوكتين الرنانتين اهتزازات أكثر من الأخرى ولكنهما تحدثان نفس العدد من الاهتزازات الكاملة لكل ثانية.

ولتوضيح هذه النقطة، يجدر بنا أن نجري تجربة بسيطة، إذا حصلت على بندولين، كل واحد مكون من خيط طوله ياردة تقريبا (44.1 سم) مع ثقل مربوط بإحدى نهايتيه. كل من البندولين سوف يستغرق قرابة ثانيتين للقيام بشوط تارجح كامل. والآن إذا ابتدأت بتحريك أحد البندولين بسحبه إلى أحد الطرفين مسافة قصيرة وكذلك بسحب البندول الآخر إلى أحد طرفيه مسافة أكبر من المسافة السابقة فإن إحداهما سوف يتارجح

بسعة صغيرة، في حين أن الآخر سوف يتـأرجح بسـعة أكـبر، علـى أن البندولـين سـوف يتأرجحان بنفس العدد من الأشواط في الدقيقة الواحدة.

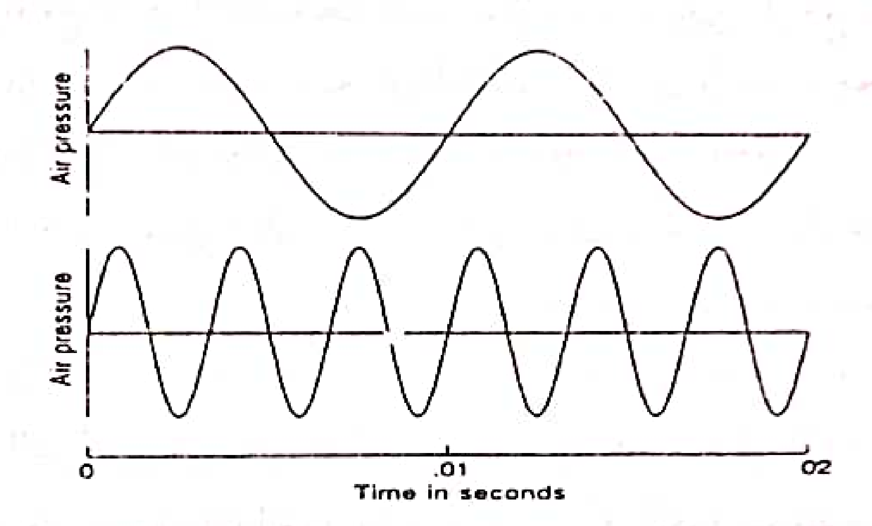
إذا كان أحد البندولين يتأرجح (يتذبذب) بعدد أقل من الذبذبات في الدقيقـة الواحدة مقارنة مع الآخر (لأن خيطه أطول)، فإنه سوف يبقى يتأرجح بهذه الطريقة بغض النظر عن مدى قوة دفعـك لـه. إن الوقـت المستغرق لإنجاز أرجحـة كاملـة (لبندول أو شوكة رنانة) لا يعتمد على السعة أو حجم كل أرجحة.

إذا قمنا بتغيير معدل تذبذب الشوكة الرنانـة، فإننـا نغـير معـدل حـدوث قمـم ضغوط الهواء (مقارنة مع شدة كلَ قمة التي هي السعة). عند قيامنـا بـهذا نكتشـف حـدوث اختلافـات في الصـوت في واحـدة مـن الطـرق الأخـرى الا و هـي درجـة الصوت. إن الفارق بي هي التي تحدث عددا أكبر من الذبذبات في الثانية الواحدة.

وعليه، فإنّ رسما بيانيا لنغمة عالية مقارنة مع آخر لنغمة منخفضة كما يبـدو في الشكل(2-3) نجد أن كلا من الصوتين ذو قمم ضغط ذات نفس السعة. ولكـن كمـا ترى في مقياس الزمن، فان إحداهما تتكرر كل 1/100 من الثانية بينما يتكرر حـدوث الثانية كل 1/300 من الثانية.

إن التغيرات في ضغط الهواء في أي صوت ذي نغمة محددة يجب أن يشكل نمطـا يكرر في فترات زمنية منتظمة. في حالة الشوكات التي كنا بصدد مناقشتها فـإن النمـط الذي يتكوّن من زيادة في الضغط إلى أن يبلغ القمة و يتبعه انخفاض حتـى يبلـغ حـدّه الأدنى قبل أن يعود إلى ارتفاع من جديد. التغير الكامل في ضغط الهواء من هذا النوع يدعى بالدورة (cycle). وهكذا فالدورة تعرف بأنـها التغـير في الضغـط مـن لحظـة يتغير فيها الضغط بطريقة محددة، إلى اللحظة التالية التي يرجـع فيـها إلى نفـس النمـط السابق. ويبدأ بالمرور بنفس النمط من التغيرات ثانية. إن الـدورة تحـدث كـل واحـد على مائة من الثانية للصوت الأوَل في الشكل 2-3، وتحدث كل جزء من ثلاثمائة من الثانية للصوت الثاني. علاوة على ذلك يجب أن يحدث في الحالة الأولى مائـة دورة في الثانية الواحدة وثلاثمائة دورة في الحالة الثانية. هذا المعدل الـذي تحـدث فيـه الـدورة يعـرف بأنـه الـتردد، ويقـاس بوحـدة هرتـز (Hertz)، ويختصـر عـادة إلى (HZ).

الصوتان المعنيان لهما الترددان على التوالي : 100 HZ ، 300 HZ . فيما يتعلق بالأهداف العملية بإمكاننا القول بأن درجة الصوت تعتمد على التردد أو معدل تكرار التغيرات في ضغط الهواء.



شكل 2-3 صوتان سعتهما متساوية، إلا أن أحدهما بقمم ضغط تحدث كل واحد من المائة من الثانية، و الأخرى بثلاث قمم تحدث ضمن واحد على مائة من الثانية.

الصوت الثاني في الشكل 2-3 ذو نغمة صوت أعلى من الأول لأنه ذو تردد أعلى بمعنى أنه خلال الصوت الثاني هنالك عدد أكبر من التغيرات الكاملة في ضغط الهواء (دورات كاملة) في الثانية الواحدة أكثر مما هو عليه خلال الثانية الأولى.

ولكي نفهم الفارق بين التردد والسعة فإنه يمكن القول أنك بأدائك تجربة البندولين كما تم وصفه سابقا ستكتشف أن بندولا سوف يتأرجح بسعة متفاوتة ولكن بتردد ثابت زمنيا. إذ، في كل مرة يستغرق نفس المدَة الزمنية للقيام بأرجحة كاملة ذهابا وإيابا (دورة واحدة). بصرف النظر عن حجم الشوط. الحقيقة الصوتية المتعلقة بهذا هي أن الشوكة الرنانة قد تنتج أصواتا ذات قمم ضغط مرتفعة أو منخفضة نسبيا، ولكننا في كل تغير كامل في ضغط الهواء نحصل على نفس المدة الزمنية. وهكذا فإن الدورة في اختلاف ضغط الهواء سوف تتكرر دائما بنفس العدد من المرات في الثانية الواحدة، وبعبارة أخرى، تردد الصوت سيبقى دائما نفسه. و

للتعبير عن ذلك باللّغة اليوميّة الدارجة، نقول بأن الأصوات الصادرة عن الشوكة الرنانة سوف يكون لها نفس درجة الصوت، على الرغم من أن الأصوات قد تختلف في علوها، إننا لا نستطيع تغيير المدّة للدورة اللّهم إلا بتغيير طول البندول أو بتغيير حجم الشوكة الرنّانة، الأمر الذي يؤدي إلى تغيير التردد. كلما أمكن تحديد نغمة صوتية لصوت ما، فإننا نكون قد جعلنا الهواء يتذبذب بصورة منتظمة، على سبيل المثال : عندما نضرب شوكة رنانة ذات درجة معياريّة A فإن تضاغطات وتخلخلات تحدث في المنطقة الهوائية المحيطة بمعدَل 440 مرة لكل ثانية، وكل موجة تضاغط تتبع بالضبط 1/ 440 لكل ثانية بعد التضاغط السابق. ونتيجة لذلك فإن طبلة الأذن عندما تتعرض لتأثير صوت كهذا فإنها تتحرك جيئة وذهابا 440 مرة في الثانية.

الأصوات ذات النغمة المنخفضة لها تردد منخفض،و تبعا لذلك، إن كثيرا من مصادر الأصوات التي تحدث نغمات منخفضة تكون أشياء ضخمة وثقيلة بحيث تتذبذب ببطء. كما هي المدة التي يتأرجح فيها بندول طويل أكثر بطئا من بندول قصير فإن الجرس الضخم له تردد أقل من الجرس الصغير و بالتالي فأن نغمته تكون أخفض مما عليه الجرس الصغير،وكذلك الأمر بالنسبة لأوتار البيانو الطويلة والسميكة فإنها على المستوى العميق والخفيض، بينما النغمات ذوات التردد الأعلى (elbert eht ta dne) تحدث بواسطة أوتار أصغر، أحيانا عند الاستماع للنغمة المنخفضة جدا للاورغ تحصل على انطباع أنك قادر على الإحساس بقمم ضغط الهواء، بل تشعر أنك ربما تقدر على عدها، هذا النوع من الإحساس لن يحدث أبدا في حال استماعك لنغمة مرتفعة. عندما تكون النغمة من حيث التردد ضعف نغمة أخرى فإنه يقال عنها أعلى بأوكتاف واحد، وهكذا فالنغمة القياسية A في البيانو ترددها ZH 440 ، وتردد النغمة التي فوقها ل HZ 880، والنغمة العالية التالية ترددها 1,760HZ. تذكر أن هذه الأرقام تطابق تكرار حدوث الذبذبات في ضغط الهواء. وهي تحدث بمعدل شبيه بتكرار اهتزازات مصدر الصوت نفسه. إن أخفض تردد يمكن لأذاننا الإحساس به كصوت يتراوح مداه بين 16-20 هيرتز. بينما تردد أعلى ذبذبة يمكن سماعها تقع في حدود تردد 20.000HZ. وما فوق ذلك لا يمكننا تمييزه على أنه صوت، ربما لأن طبلة الأذن والعظام المتصلة بها لا يمكنها التذبذب بالسرعة الكافية. عند دراسة

الكلام، فإننا بالمقام الأول معنيون بالتردد ما دون 20.000 HZ بكثير جدا، إن أسرع ذبذبة يمكن لجهاز هاتف عادي نقلها هي حوّل 3500 HZ ومعظم الموجات الصوتية محل الاهتمام في تحليل الكلام هي ما دون 800 HZ.يتفاوت تردد نغمة من النغمات بطرق شتى، كما سبق و لاحظنا في الأحوال الاعتيادية، الشوكة الرنانة ذات الأطراف الطويلة تتذبذب بشكل أبطأ (بمعنى أنها تنتج نغمة ذات تردد أكثر انخفاضا) مقارنة مع شوكة ذات أطراف أقصر. ونفس الوضع فإن وترا طويلا مشدودا كما في (double bass)، يهتز بشكل أبطأ من آخر أقصر في آلة الكمان، الذي تبعا يكون أعلى في النغمة.

وهناك طريقة أخرى في تغيير تردد الوتر و ذلك بواسطة زيادة شده، وهكذا فإن عازف الكمان يعدل أوضاع أوتار آلته شدا أو إرخاء في سبيل زيادة أو خفض التردد.

إن الأوتار الصوتية التي سأناقشها لاحقا تتذبذب بسرعة أكبر عندما تكون خاضعة لشد أكبر. و أخيرا فإن الاختلاف في حجم الجسم المتذبذب سوف يؤثر على التردد، وتر سميك، بطول معلوم تحت توتر معيَن سوف يتذبذب بصورة أبطأ مقارنة مع وتر مماثل رقيق له نفس الطول. إن الأوتار الصوتية عند الرجال عموما تحدث نغمة أخفض مما هو عند النساء التي عادة ما تكون أقصر وأرق.

عندما نستخدم المصطلح العلمي pitch حين الإشارة إلى ذلك الجانب من الصوت فإننا نعني به أننا عند استخدام آذاننا فقط، نستطيع وضع ذلك الصوت على مقياس يتدرج بين الدرجة الخفيضة و العالية، وعندما نناقش معدلات محددة من التردد أو معدلات التغير في ضغط الهواء فإننا نتحدث عن التردد في الصوت. و يقال الشيء ذاته بالنسبة لمصطلح العلو، فالعلو هو المصطلح الذي نستخدمه عند وصفنا لإحدى الطرق التي يتم من خلالها إدراك الاختلاف في الأصوات المسموعة. إن ذلك مرتبط (زيادة أو نقصا) بعوامل القياس الآلية التي ندعوها شدة الصوت.الشدة مشتقة من السعة أو كمية الزيادة في ضغط الهواء خلال الصوت. في الفصل السادس سوف أتوسع في شرح هذه الأمور لكن الآن يمكننا القول فقط أنه عندما يتم تغيير تردد الصوت عندها فقط يكون هناك اختلاف في درجة الصوت، و كذلك عندما تزداد سعة الصوت بينما يبقى التردد ثابتا، عندها نسمع زيادة في العلو.

الفصل الثالث

النــــوعيــة

الفصل الثالث

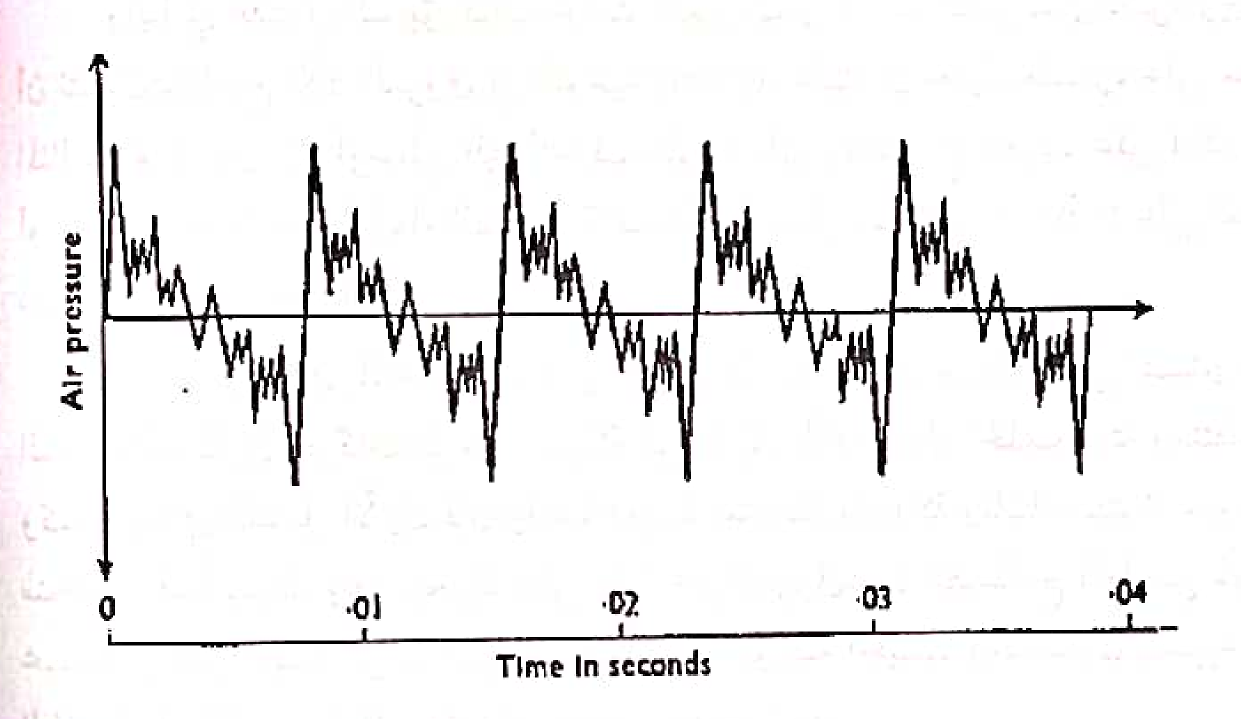
النـوعيـة

رأينا في الفصل السابق كيف تحدث التغيرات في درجة الصّوت والعلو، ويجب أن نتناول بالشرح الآن الفروق في النوعية quality، علينا أن نحاول تفسير، على سبيل المثال، الفرق بين C الوسطى التي تُعزف على البيانو وتلك التي تعزف على الكمان، أو ما هو أهم بالنسبة لعلماء الصوت كيف يمكننا عمل صوائت vowels على نفس درجة الصوت .pitch

بحثنا حتى الآن بالتفصيل نوعا واحدٍ فقط للنغمة الموسيقية التي تصدر عن الشوكة الرنانة إن حركات فرعي الشوكة الرنانة إلى الأمام وإلى الخلف ثابتة ومنتظمة، وكما رأينا في الفصل الأول فإن رأسا مدببا ملتصق بشوكة رنانة مهتزة، سيرسم منحنى سلساً بسيطاً وهو يتحرك على طبق من الورق، إن المصطلح العلمي لموجة محسوبة رياضيا كهذه الموجة هو Sine wave موجة الجيب وسأتناول بشيء من التفصيل في الفصل العاشر طبيعة موجات الجيب هذه.

ليس لجميع الأصوات أنماطاً موجية سهلة كتلك التي تصدر عن الشوكة الرنانة، ويرجع السبب في ذلك إلى أن معظم مصادر الصوت تهتز بطريقة أعقد بكثير، ويبين الرسم التوضيحي 3-1 شكل الموجة الصادرة حينما تعزف نغمة من النغمات على البيانو، تذكر بأن هذا الرسم التوضيحي يعني بأننا إذا تمكّنا من قياس ضغط الهواء، سوف نجد بأن الضغط ارتفع وانخفض كما هو مبين، ولو قيّض لك أن تسمع هذه النغمة، فإن ضغط الهواء حول طبلة أذنك ستتأرجح صعودا ونزولا كما هو موضح في الشكل 3-1. إن ميكروفونا بالإضافة إلى معدات أخرى تسجّل هذه التغيرات في الضغط، ويرتكز هذا الرسم التوضيحي على تسجيل لقياسات ضغط الهواء تم ضبطها بمساعدة ميكروفون مثبت على مسافة قصيرة من البيانو.

عندما يكون هنالك تقلبات معقدة في الضغط، فلا بدّ أن تكون ذرات الهـواء في حالة حركيّة معقدة فذرات الهواء التي اختل استقرارها بسبب اهتزازات الشوكة الرنانة تتحرك إلى الخلف وإلى الأمام بالطريقة الّميسرة الـتي سبق لي وصفـها، وتطابق حركات هذه الذرات حركـة كـرة الرقـاص (البنـدول)، حيـث بـدأت بـالتّحرك في سرعتها إلى أن وصلت هذه الذرات الي وضعها الطبيعي، ومن هناك تباطأت سـرعتها إلى أن بلغت الحد الأقصى لزحزحتها في



شكل 3-1 نمط الموجة لِـ C أسفل C الوسطى على البيانو.

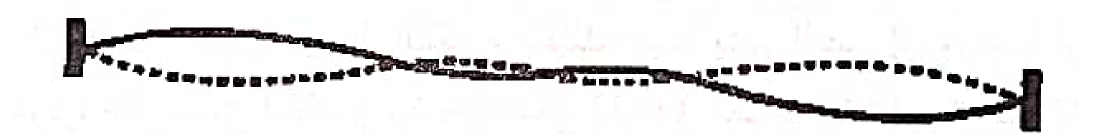
الجهة الأخرى. كما سبق وأن شاهدنا فإن هذا النوع من الحركة يطابق التقلبات في ضغط الهواء، والذي يمكن تمثيلـه بواسـطة منحنيـات سلسـة بسـيطة تعـرف باسـم موجات الجيب.

إن التغيّرات في ضغط الهواء بالنسبة للصوائت(vowels) اكـثر تعقيـدا بكثـير، وبعبارة أخرى فإن حركات ذرات الهواء وهي تنقل مثل هـذا الصّـوت معقـدة جـدا، ويعود السبب في ذلك للطريقة المعقدة التي يهتز من خلالها الهواء في القناة الصوتية. و بخلاف فرعي الشوكة الرنانة اللتين تتحركان إلى الأمام وإلى الخلف بكل بسـاطة، فـإن هذا الحجم من الهواء يمكن حفزه على الاهـتزاز بطـرق شـتى في آن واحـد. إن فكـرة

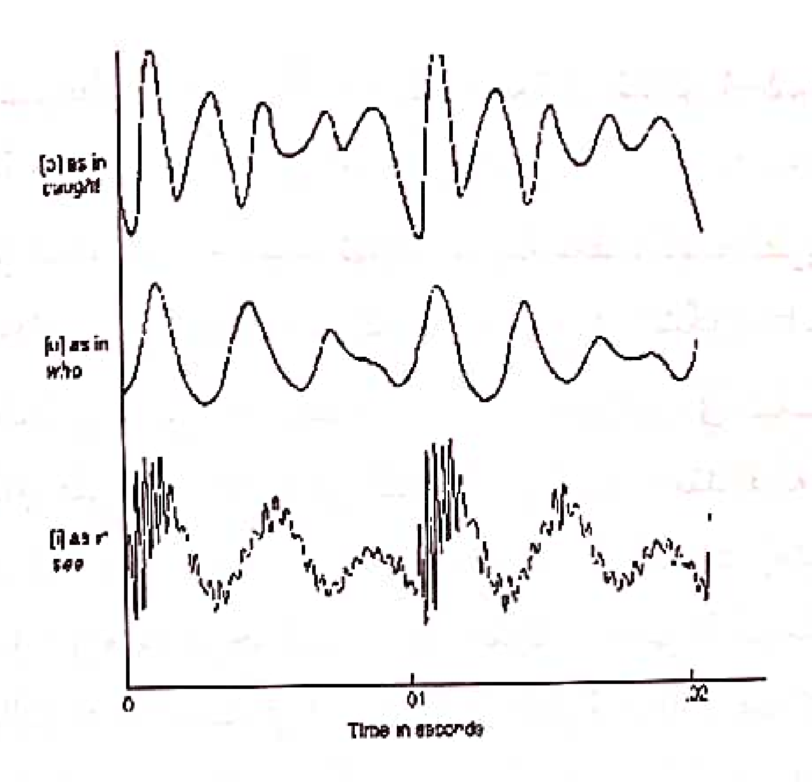
جعل جسم يهتز بطرق شتى في آن واحد موضحة في الشكل 3-2، وهي كيف يمكن لأجزاء مختلفة من وتر الاهتزاز في نفس الوقت.

إن وتر البيانو ولوحة البيانو تهتزان بطريقة معقدة كهذه الطريقة، الأمر الذي يؤدي إلى اختلافات في ضغط الهواء كما هو موضح في الشكل3-1.

إذا تمعنت في شكل 3-1، سوف تجد أن الاختلافات في ضغط الهواء يسودها نوع من النظام، ففي كل 1/100 من الثانية يكرر النمط المعقد نفسه ككل، كما سبق لي شرحه، إن نمطا لتغيرات في ضغط الهواء تتكرر في فترات زمنية منتظمة تسمّى بالدورة Cycle وتعتمد درجة الصوت إلى حد كبير على السّرعة التي تتكرر فيها الدورات فالتردد إذن يساوي 100 دورة في الثانية أو 100 هيرتز. إذا ازداد التردد ارتفعت درجة الصوت. وعلى العكس من ذلك، إذا قلّ التردد انخفضت درجة الصوت، إن جميع الرسومات التوضيحية في هذا الكتاب تتضمن مقياسا للزمن، وعليه من المحتمل على الأرجح أن نحسب التردد الأساسي لتكرار



شكل 3-2 الخط المستقيم: أحد الأوضاع لوتر مهتز.
الخط المتقطع: وضع آخر، يمثل اهتزاز أجزاء الوتر و قطاعاته.



شكل 3-3 الشكل الموجي الناتج عند لفظ الصوائت الإنجليزية [ɔ:] في caught، [u] في who و [i] في see التردد الأساسي 100 هرتز تقريباً. و يمثل المقياس العامودي في هذا الشكل كما في غيره من الأشكال الاختلافات في ضغط الهواء.

الموجات الصوتية. حاول التأكد من ذلك حينما يشير النص إلى موجة ترددها 100 هرتز، على سبيل المثال. ويوضح الشكل (3-3) نمط موجة تكرر نفسها كل 1.ر ثانية، كما يشير إلى ذلك مقياس الزمن.

إن الفرق بين أنواع الأصوات المنبعثة من الشوكة الرنانة، البيانو والصائت (vowel) يعود إلى تعقيد شكل الموجة وحيثما كان الفارق بين الأصوات فارقا في النوع، فسوف نجد اختلافاً بين أشكال الموجات لتلك الأصوات، ويبين الشكل 3-3 نطق مؤلف هذا الكتاب لثلاثة صوائت هي:

[ɔ:] في كلمة caught

[u] في كلمة who

[i] في كلمة see

إن الرموز المستخدمة بين الأقواس هي رموز مستخدمة في أبجدية جمعية الأصوات الدولية، ولهذه الأمواج أشكال معقدة جدا، إلا أنك ترى أن هذه الأصوات جميعا لفظت بنفس المستوى من درجة الصوت، وفي كل حركة نجد أن النمط يكرر نفسه كل واحد من المائة من الثانية، إن الفرق بين جميع هذه الحركات يكمن في بعد النوع، إننا نسمعها صوائت مختلفة لأن كل صائت يتميز عن سواه كموجة صوتية خاصة به، وإننا نسمعها على درجة صوت واحدة لأن شكل الموجة المعقدة يتكرر بنفس السّرعة.

إن أحد الأهداف الرئيسة لهذا الكتاب هي إيجاد طريقة لوصف الأمواج الصوتية، وقد رأينا كيف نحدد درجة الصوت طبقا للتردد، أو حسب عدد الاهتزازات في الثانية، وعرفنا كيف نحدد علو الصوت وفق السعة، أو طبقا لعدد تغيرات الضغط. وعلينا الآن أن نصف النوع طبقا لأشكال الموجة المركبة.

إن تردد جميع هذه الحركات يبلغ 100 هيرتز لان النمط الرئيس يكرر نفسه حوالي مرة واحدة كل واحد على مائة من الثانية. إلا أننا نرى في كل صائت موجة أو موجتين من الموجات المنتظمة إلى حد ما مركبة فوق النمط الرئيس مطابقة له. ففي الصائت [ɔ:] كما في كلمة caught تكرر هذه الموجة المضافة نفسها خمس مرات تقريبا لكل تكرار من تكرارات النمط الرئيس (بإمكانك أن تعد خمس قمم ضمن التكرار الواحد). نحن نعلم بأن تردد الموجة المركبة يتكرر بمقدار 100 هيرتز. ولذلك، فأن الموجة الأصغر في [ɔ:] ذات تردد يساوي 500 هيرتز تقريبا. وكذلك الحال، في الصائت [u] كما في who، هناك موجة ترددها يساوي ثلاثة أضعاف التردد الأساسي تقريبا، حيث يوجد ثلاثة قمم ضمن كل تكرار وبالتالي فأن التردد يبلغ 300 هيرتز. والصائت [i] كما في see، من الناحية الأخرى، له موجتان يمكن الفصل بينهما بالعين المجردة. إحداهما بتردد 250 هيرتز، لأنها تكرر نفسها مرتين ونصف تقريبا في كل تكرار للنمط المركب. والموجة الأخرى تمثل اختلافاً في الضغط سرعته اكثر بكثير من سرعة الموجة الاولى. ويبدو وكأنها مركبة على قمة موجة 250 هرتز، وتحدث حوالي 27 مرة كل تكرار للنمط المعقد (يمكنك ان تعد 27قمة صغيرة). ان تردد هذه الموجة اذن 2700 هيرتز.

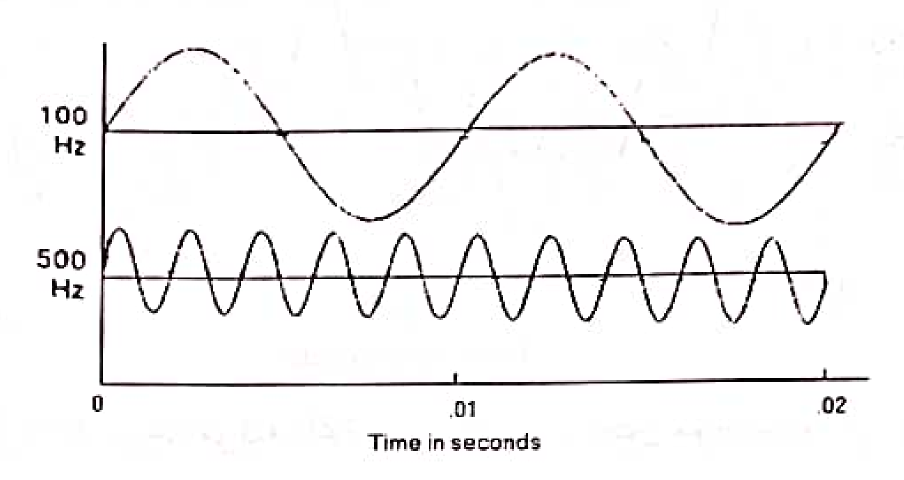
يمكننا الآن أن نرى كيف توصف الاختلافات في نوع الصوت. تتميز الصوائت [i] في كلمة see، [ɔ:] في كلمة caught و [u:] في كلمة who، عندما تلفظ جميعاً على نفس الدرجة (100 هيرتز) بوجود ترددات إضافية، والقيم التقريبية للترددات الإضافية الرئيسية هي: 500 هيرتز للصائت [ɔ:]، 300 هيرتز للصائت [u] و250 هيرتز و 2700 هيرتز للصائت [i]، و هذا بالطبع تبسيط مفرط للوضع.

وكما سنرى فيما بعد، يتعين علينا أن نصف الأصوات المعقدة على أنها تتألف من أكثر من مجرد ترددين أو ثلاثة، وأن القمم المعطاة للصوائت في هذا الشكل ليست أوصافا مناسبة لهذه الأصوات على وجه العموم، إلاّ أن هذا الأسلوب في التحليل المستند إلي الوسائل الإيضاحيّة المرئية مفيد كوصف تمهيدي.

إذا حاولنا الآن توليف الصوائت بإحداث عدد من النغمات النقية في آن واحد، نرى عيوب مثل هذا النوع من التحليل، لنفترض أننا نريد أن نوّلف الصائت [ɔ:] في كلمة caught عن طريق شوكة رنانة ترددها 100 هيرتز (لأن هذا التردد هو التردد الأساسي لتكرار شكل الموجة المركبة)، إضافة إلى شوكة رنانة بتردد 500 هيرتز (لأن التردد هذا كان التردد الذي تمّ تركيبه ومطابقته باعتبار أنه التردد المميز لهذا الصائت)

يمثل الشكل 3-4 الاختلافات في الضغط الناتجة عن الشوكتين حين طرقهما كل على حدة.

عندما تطرق الشوكتان معا، يتأثر ضغط الهواء من كلتيهما، ويبين الشكل 3-5 هذا الوضع، الخطوط الأكثر دقة تمثل الاختلافات في الضغط الناتجة عن طرق الشوكتين كل على حدة

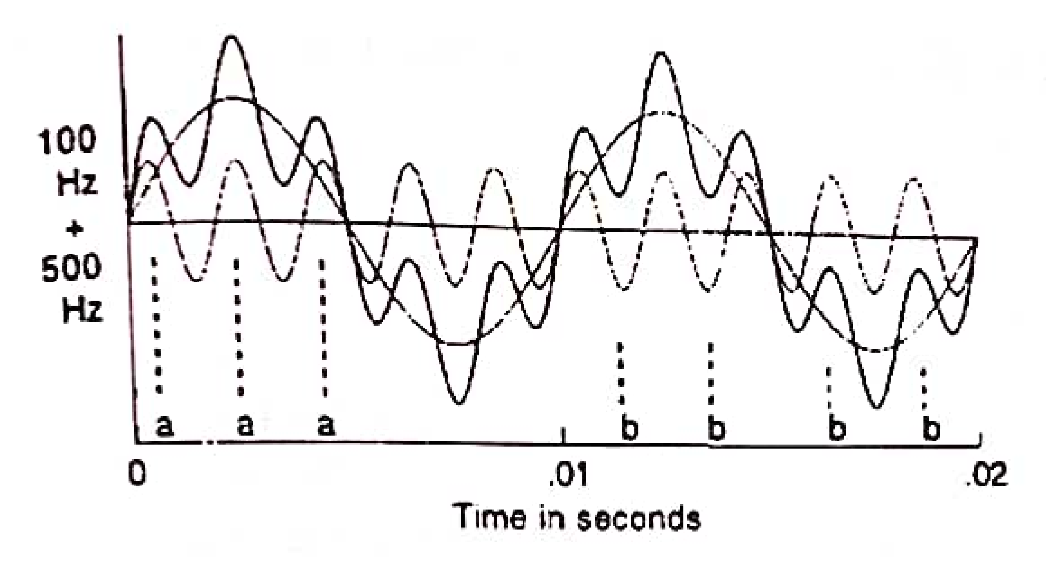


شكل 3-4 التغيرات في ضغط الهواء الناتجة عن شوكتين مهتزتين، إحداهما بتردد 100 هرتز و الأخرى بتردد 500 هرتز، و كل شوكة تهتز على انفراد بمعزل عن الأخرى.

بينما يمثل الخط الأكثر سوادا نمط الموجة المتحـــدة الناتجـة عـن دمـج الموجتـين، وكما ترى عندما تعمل الشوكتان معا لزيادة الضغط (كما هو مبين في الأوقات المشار إليها بالحرف

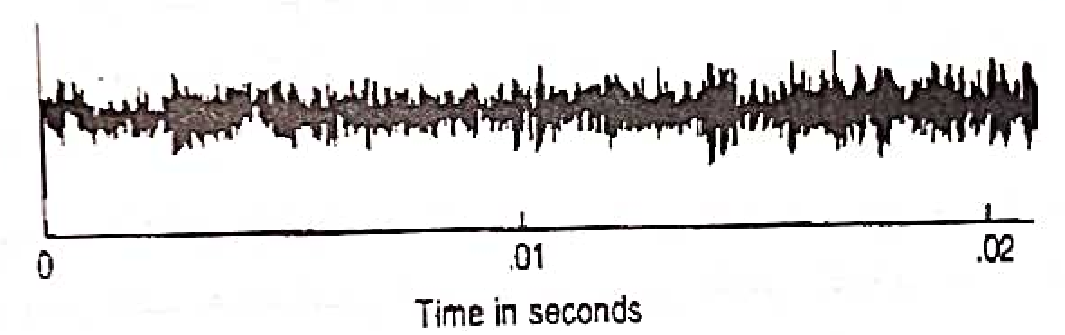
(:a) في الشكل، فإن الضغط الناتج يزيـد عـن الضغـط النـاتج عـن أي منـهما فرادى، ومثل ذلك، عندما تعمل الشوكتان معا علـى خفـض الضغـط، فـإن الضغـط الناتج أقل من الضغط الذي يمكن أن ينتج من عمل أي منهما بمفردها، ولكن عندمـا تعمل كلتا الشوكتين الواحد ضد الأخرى، فإن الواحدة تحـاول زيـادة الضغـط بينمـا تحاول الأخرى العمل على النقص منه (كمـا هـو واضـح في الأوقـات المشـار إليـها بالحرف b في الشكل)، والضغط الناتج يقع تقديره في مكان ما بين الاثنين.

إلاّ أن شكل الموجة في الشكل 3-5 لا يشبه شكل الموجة للصائت [ɔ] في الشـكل 3-3 ، غير أن هذا الأمر لا يثير الدهشة لأن توليف الشوكتين معا لا ينتج صائتـا، إن هـاتين الموجتين اللتين قد تمثلان اختلافات في الضغط حول آذاننا (وبالتالي همـا مرتبطتـان مباشـرة بحركات طبلات آذاننا) ليست بأشكال موجات لأصوات متشـابهة. إن شـكل الموجـة لأي صائت أعقد بكثير من شكل الموجتين الصادرتين عن الشوكتين.



شكل 3-5 موجة مركبة ناتجة عن تركيب موجتين موضحتين في الشكل 3-4

خلال دراستنا لموجات أصوات الكلام، يتعين علينا أن ندقق النظر في أشكال موجات أعقد بكثير من أشكال موجات الصوائت، ويوضح الشكل 3-6 شكل الموجة التي ترسم للصائت



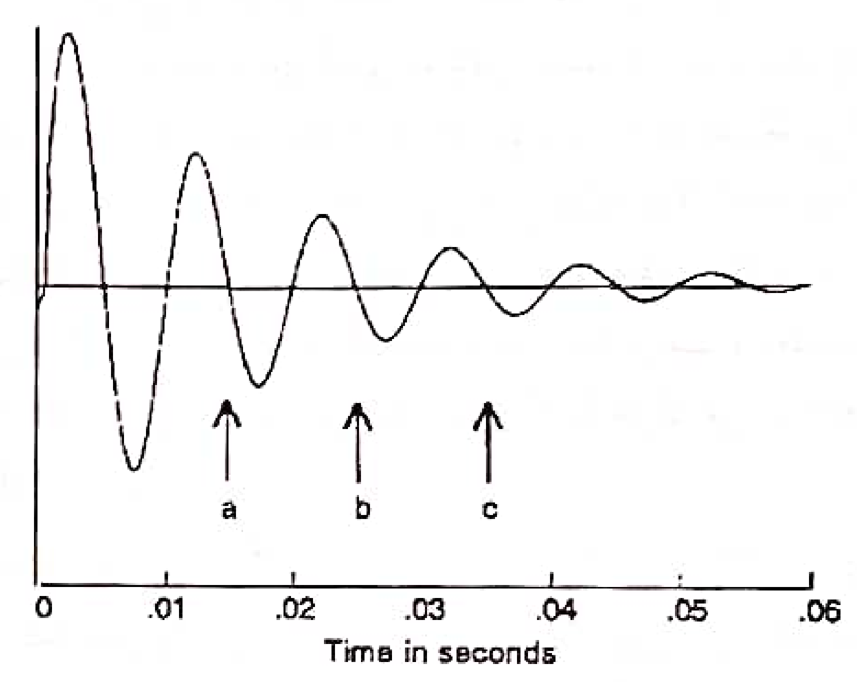
شكل 3-6 جزء من موجة الصوت عند نطق الصائت [s] في نهاية الكلمة mouse

ربما كالمعتاد نعتبر الرسم لشكل الموجة تمثيلا لما يحدث جوار طبلات آذاننا، وبالطبع فإن هذه التغيرات ستحدث حركات في طبلات آذاننا وسيدركها الدماغ على أنها أصوات، لكن بخلاف جميع الأصوات التي درسناها حتى الآن، ستكون اهتزازات طبلة الأذن غير منتظمة لأن ضغط الهواء يزداد وينقص بطريقة غير منتظمة.

ويحسن بنا أن نعير انتباهنا إلى أصوات لا تتبع اختلافات الضغط فيها نمطا منتظما، وهذه الأصوات تندرج ضمن فئة من الأصوات تختلف عن تلك الفئة التي تتميز بدورة يتفاوت الضغط فيها بحيث يكون هذا التفاوت في فترات زمنية منتظمة تماما، ويوضح الشكل 3-7 صوتا آخر ذو نمط موجي غير متكرر.

لاحظ بشكل خاص أنه على الرغم من أن الاختلافات في ضغط الهواء خـلال الفترة الزمنية من a – b تشبه تلك التي تحدث خلال الفترة الزمنية من b إلى c، إلا أن سعتهما مختلفة بشكل واضح، وعليه، فهما غير متشابهتين.

وفي هذا الصوت، لا يوجد نمط للاختلافات في ضغط الهـواء تتكـرر في فـترات زمنية منتظمة تماما.



شكل 3–7 شكل موجي غير متكرر.

وبالطبع، إن توخينا الدقة في بحثنا عن الأصوات يجب أن نعترف بأن كل صوت بحثنا فيه حتى الآن (وحتى أي صوت يمكــن لنـا أن نتحـدث عنـه مسـتقبلا) لـه في الواقع نمط موجي غير متكرر، فلا يوجد صوت حقيقي يتكرر نمط اختلافات الضغـط فيه في فترات زمنية منتظمة إلى الأبد، إلى الأبد.

وكما رأينا سابقا، حتى اهتزازات الشوكة الرنانة تتلاشـى في النهايـة، وبالتـالي، فلكل موجة سعة أقل من الأخرى التي سبقتها، وإضافة إلى ذلك تهتز الشـوكة الرنانـة بفعل ضربة، إلى أن تصل حالة اهتزاز ثابتـة، والموجـات أبعـد مـا تكـون عـن كونـها منتظمة (متكرّرة).

ومع ذلك، فإن الأخطاء الناتجة عن عدم الأخذ بهذه الأخطاء بالحسبان صغيرة جدا، وتسهيلا للأمور سنولي عناية لبعض الأصوات التي تتميز بدورات اختلافات ضغط تتكرر في فترات زمنية منتظمة، وفي نفس الوقت سنعتبر الأصوات الأخرى غير منتظمة.(إن التمييز بين هاتين الفئتين سنتناوله بمزيد من البحث في الفصل السابع).

إن كلتا الفئتين من الأصوات موضع اهتمام عظيم لدى طلبة اللغات، كما نعرف تتألف الكلمات المنطوقة من أصوات يتغير نوعها باستمرار وفي بعض الأحيان، على نحو ما هو حاصل في بداية الكلمة Peak ونهايتها، يتغير نمط شكل الموجة بسرعة كبيرة. إن التغيرات في ضغط الهواء الذي يؤثر على آذاننا فجائية وعشوائية، وبالتالي، فسنعتبر الكلمة Peak على أنها تبدأ وتنتهي بنمط موجي غير متكرر، وبالمقارنة مع هذين الصوتين فإن الصائت في وسط الكلمة Peak يستمر مدّة معقولة من الزمن دون تغيير في نوعه، وعليه سنعتبر هذا الجزء من الكلمة مؤلفا من اختلافات منتظمة في ضغط الهواء.

إن إحدى خصائص الأصوات ذات الموجات غير المتكررة انعدام درجة الصوت فيها، كما سبق وأن رأينا، تعتمد درجة الصوت إلى درجة كبيرة على التردد الذي تكرر فيه دورة ضغوطات الهواء، فالأصوات التي تخلو من نمط موجي متكرر ليس لها درجة صوت محددة. حينما نصغي إلي التنوعات غير المنتظمة في ضغط الهواء نتيجة إشعال عود من الثقاب، أو إلى حفيف أوراق الشجر لا يوجد الشيء الكثير الذي يمكن أن نقوله عن درجة الصوت لهذه الأصوات، كما أن الصوتين في بداية كلمة Peak ونهايتها لا يسببان أي إحساس بدرجة الصوت لدينا، وإن قيل لنا بأن هذه الكلمة تمّ النطق بها على درجة معينة من الصوت فإن الأمر يتعلّق بالتغيرات المنتظمة في ضغط الهواء والتي تحدث في الجزء الأوسط من الكلمة.

إن أحد الفروق الرئيسة بين هذا الكتاب وغيره من كتب فيزياء الكلام acoustics أننا غالبا ما نعني بأنماط الموجات غير المتكررة، ويتعين علينا أن نبحث في جميع الأصوات سواء أكانت أصواتا لا نمط لأشكال موجاتها أو شبه متكررة.

وهناك مسمّى خاص للصوت ذي الشـكل الموجـي المعقـد غـير المتكـرر وهـو white noise .

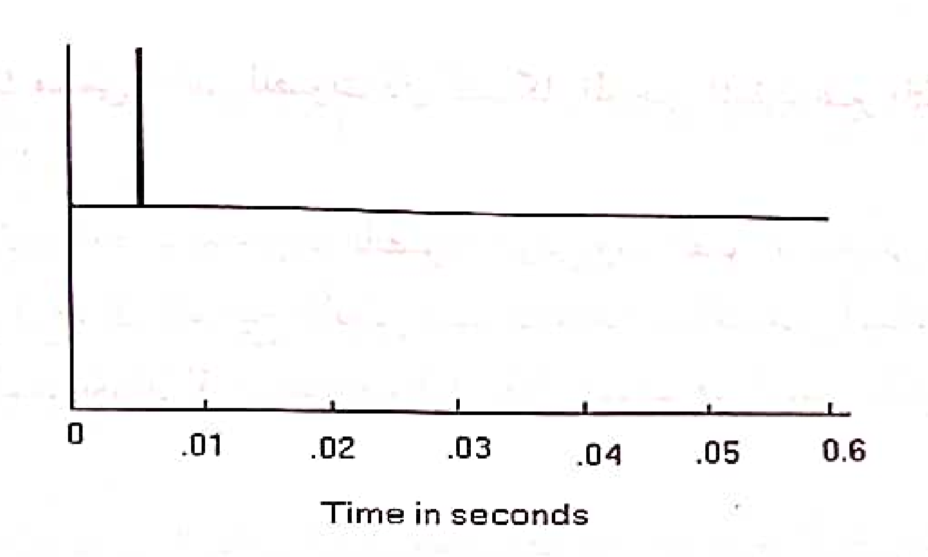
وأطلقت هذه التسمية قياسا بالضوء الأبيض وهو الضوء الناتج عن مزج جميـع الوان قوس قزح، إن الضجيج الأبيض صـوت معقـد يتـألف مـن كميـات متسـاوية للنغمات المسموعة، إن أقرب مفهوم مألوف لهذا الصوت هو الهسيس الذي نسمعه في الراديو.

إن العديد من أصوات الكلام معقد مثلها مثل الضجيج الأبيض، ذكرنـا قبـل قليل الصوت الذي يحدث في آخر الكلمة mouse، أصوات أخـرى مـن هـذا القبيـل تحدث في بداية كلمة fish و نهايتها.

وهناك نمط موجة معقدة على جانب عظيم من الأهمية في دراسـتنا للكـلام، وهو الشكل الموضح في الشكل 3-7 وهذا النوع من الأصوات يحدث عندمـا يعطـى الهواء في القناة الصوتية ضربة tap حـادة، ويـدل الشـكل علـى أن الضغـط يتفـاوت بطريقة منتظمة نوعا ما، إلاّ إن سعة كل قمة من قمم الضغط أقل بكثير من سعة قمـة الضغط التي سبقتها.

وأخيرا، يتعين علينا أن نلتفـت إلى الصـوت المطـابق للضربـة الحـادة علـى جسم لا يميل إلى الاهتزاز بطبيعته. إن كانت الضربة حادة بما فيه الكفاية، فقد تتسـبب من الناحية النظرية

في زيادة فورية في ضغط الهواء وفي تناقصه بسرعة مرة أخرى، كما هو موضـح في الشكل 3 - 8.



شكل 3-8 موجة صوتية لنقرة حادة أو طقطقة.

إن تغيرا في الضغط بهذه الحدّة له بعض الخواص النظرية الهامّة، وسنوليها قدراً من العناية فيما بعد، إلاّ أن هذا لا يمكن حدوثه في واقع الأمـر. إن أقـرب مـا يمكـن تصـوره بالنسبة لهذا الصوت "الطقطقة" click حينما نفتح جهاز مكبر الصوت ونغلقه.

وكما سنرى لاحقا في الفصل التالي، إن قسمة جميع الأصوات إلى فئتين حسب كونها موجات تكرارية أو غير تكرارية هي قسمة تمّت لسهولة الإيضاح، حبذا لو أن هنـالك مصطلح يغطي جميع الأصوات ذات الأشكال الموجية غير المتكررة، بما في ذلك الضجيج الصفيري الذي يطول مداه إلى وقت معين، أو لصوت مزعج ينتج عند ارتطام جسم ساقط بالأرض، أو لطقطقة click تنتج عن تنوع حاد في ضغط الهواء.

ولما لم يكن متوفرا لدينا مصطلح عام لجميع هذه الأصوات، سنستمر في وصفها كأصوات يمكن اعتبارها "لا تكرارية" non repetitive وبـالرغم مـن أن هـذه العبـارة غير مستساغة إلاّ أننا لا نستطيع تجنبها.

الفصل الرابع

تحليل الموجات

الفصل الرابع

تحليل الموجات

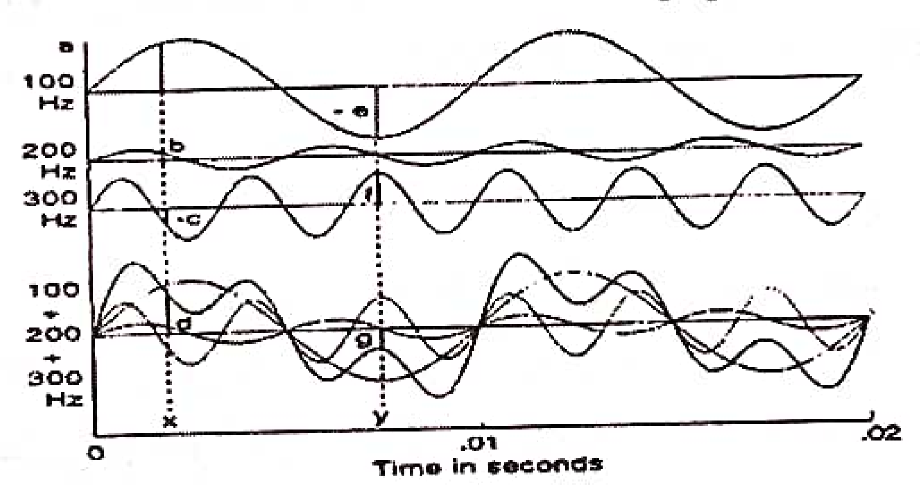
لقد رأينا في الفصل السابق بأن نغمتين نقيتين بمقدورهما أن تتحدا لإنتاج موجة ذات شكل معقد . ومما لا يمكن إدراكه بسهولة أن أيَ شكل من أشكال الموجة مهما كـان نوعه، يمكن توليفه من عدد كاف من النغمات النقية : أشكال موجة الصوائت في الشـكل 3-3 وأنماط الموجة اللاتكرارية التي كنا قد ناقشناها في نهاية الفصل السابق يمكن أن تولف جميعها، بشرط أن نأخذ عددا كافيا من النغمات النقية وندمجها بطريقة ملائمة.

يعْرف نظام التحليل الذي تعتبر من خلاله الموجة المركبة على أنها مجموع عـدد من النغمات النقية ب تحليل فورير (Fourier analysis)،واكتشـفت النظريـة الـتي يتضمنها هذا النظام من قبل عالم الرياضيات الفرنسي فورير (Fourier) عـام 1822، إنها مفهوم أساسي في علم الصوت الذي يستحق عددا من الإيضاحات :

ربما نبدأ بدمج موجة بتردد 100 هرتز مع موجة صغيرة بتردد 200 هرتز وموجة أكبر نوعا ما بتردد 300 هرتز. النتيجة مبينة في (الشكل 4-1). إن الموجة المركبة هـي ببساطة نتيجة إضافة الزيادات في ضغـط الهـواء (بمعنـى، تلـك النقـاط الممثلـة علـى المنحنى فوق الخط الذي يمثل الضغـط الطبيعـي) وطـرح التنـاقص في ضغـط الهـواء (تلك النقاط الممثلة أسفل الخط). في الزمن x، على سبيل المثال، اثنتان من النغمات النقية كانتا تسببان زيادات في الضغط بكميـات ممثلـة بواسـطة الخطـين a وb، بينمـا النغمة الثالثة كانت تسبب نقصانا في الضغط بكميـة ممثلـة بواسـطة الخـط c. وضغـط الهـواء النـــاتج يمتلــك ســعة ممثلــة بــالخط d، والــذي يســاوي طولــه طــول : (a + b – c).وبالمثل، في الزمن y ضغط الهواء النـاتج (g -)، بسـبب أنـه أسـفل الخط، بما معناه، النقطة تمثل لحظة من التخلخل أو انخفاض في الضغط) في هذه الحالة

g = e+f-، في هذه اللحظة المكون ذو التردد 200 هيرتز ليس له تأثير لأن سعته صفر. أي نقطة في الموجة المركبة يمكن أن تعامل على هذا النحو، الضغط في ذلك المثال هو دائما نتيجة دمج (إضافة أو طرح) تغيرات الضغط الناتجة عن مكونات الموجات كل على انفراد. للتحقق من هذا الأمر حاول قياس ارتفاعات عناصر الموجات عند أي زمن مناسب وتأكد من أنها تتحد لإحداث النقطة التي تحدث في نفس اللحظة على الموجة المركبة.

إذا اعترضنا سبيل موجة كتلك التي قد تم توليفها في الشكل4-1، ستكون مشكلتنا في معرفة كيف نصفها. قبل كل شيء، بمقدورنا أن نرى بأن تردد تكرار شكل الموجة المركبة وهو 100 هيرتز.



شكل 4-1 موجة مركبة من مزج ثلاث موجات تردداتها على التوالي: 100 هرتز، و200 هرتز، و300 هرتز.

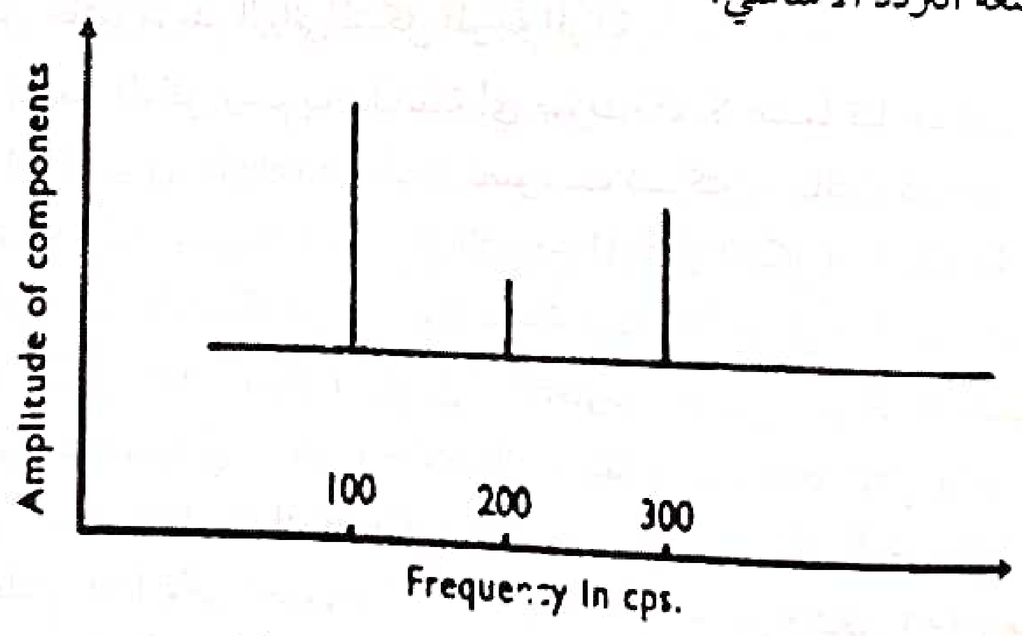
وهذا ما يعرف بالتردد الأساسي (fundamental frequency) أو في بعض الأحيان الذبذبة الأساسية (fundamental)، ودرجة الصوت التي نسمعها تعتمد بالدرجة الأولى على التردد الأساسي.

في سبيل وصف شكل الموجة وصفا تاما، علينا أن نعين مكونات الموجة المركبة. في هذه الحال، باستطاعتنا القول بأنه يمكن اعتبار الموجة المركبة مكونة من التردد الأساسي وهو 100 هيرتز بالإضافة إلى نغمتين أخريين، تلك النغمات الإضافية تعرف بالنغمات التوافقية (overtones).

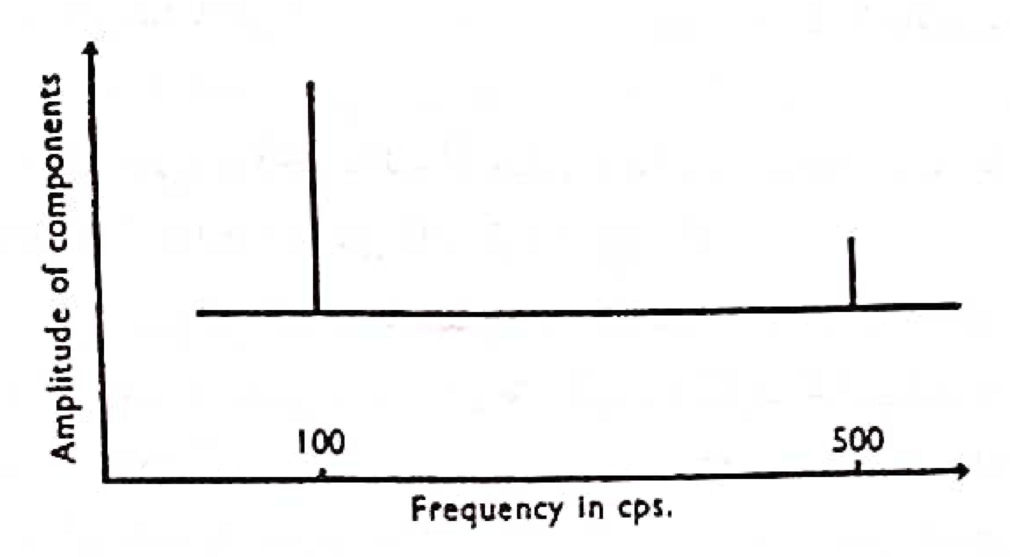
والتوافق هو عبارة عن أي عدد صحيح مضاعف التردد الأساسي، بالنسبة للموجة التي نحن بصددها تدعى المكونات بالتوافقين الثاني والثالث، لأن الأول ضعف التردد الأساسي، والآخر ثلاثة أضعاف، وإذا وجدت مكونات بتردد 400 هيرتز و 1000 هيرتز عندها ستسمى بالتوافقين الرابع والعاشر.

في بعض النصوص القديمة المتعلقة بعلم الصوت (acoustics) المكون الذي تردده يساوي ضعف الأساسي يسمى التوافق الأول، والمكون الذي تردده يساوي ثلاث أضعاف التردد الأساسي يسمّى التوافق الثاني وهكذا.... نحن نرفض هذه العادة القديمة لأن حسابها مشوش كما في الفرنسية ثمانية أيام تقابل أسبوع "eight days" ب" a week" وخمسة عشر يوما تقابل أسبوعين" fortnight". في هذا الكتاب سيكون للتوافق الثاني تردد هو ضعف التردد الأساسي دائما.

إن وصفا أكثر شمولية كما في الشكل لا يعين مكونات الترددات فحسب (وهي في هذه الحال 100 هيرتز، 200 هيرتز، 300 هيرتز) ولكن يعيّن أيضا سعاتها (بما معناه، حجم قمم الضغط في هذه المكونات)، وكما يبدو في الرسم، إن سعة التردد الأساسي أكبر الثلاثة، سعة التوافق الثاني أصغر نوعا ما وسعة الثالث تقريبا ثلاثة أخماس سعة التردد الأساسي.



شكل 4-2 طيف الموجة المركبة الموضحة في الشكل 4-1



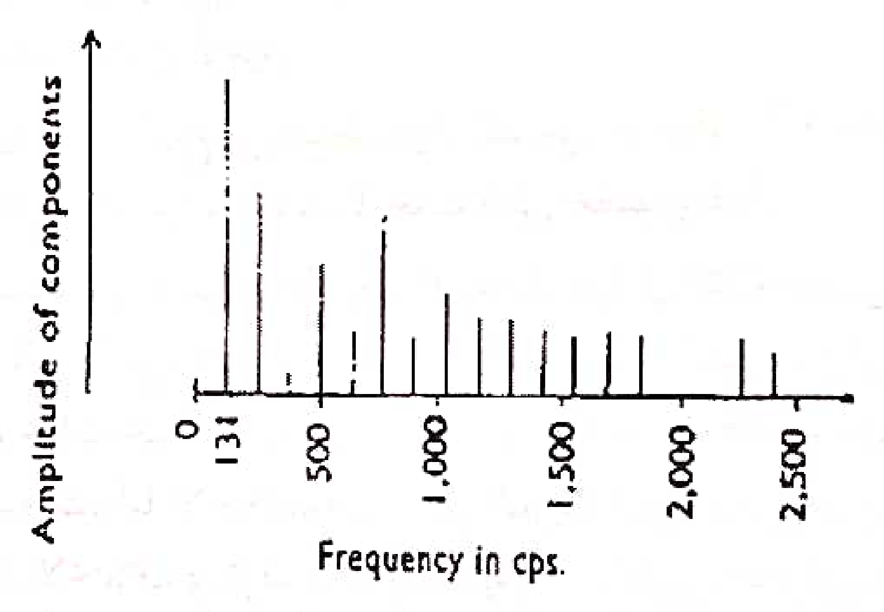
شكل 4-3 طيف الموجة الموضحة في شكل 3-5

إذا مثلنا للسعات التقريبية للمكونات بالأطوال الـ ـيبية للخطوط، يمكننا رسم بيان كما هو موضح في الشكل 4-2. هذا النوع من الرسم البياني ذو أهمية كبـيرة في علم الصـوت

(acoustics) إنـــه يدعـــى الرســـم الطيفـــي للصـــوت (بصمـــة الصـــوت spectrum). إنه عرض لمكونات الصوت، بالتـالي يزودنـا بوصـف أبسـط مـن ذلـك المعطى من خلال الرسم البياني لشكل الموجة المركبة.

إنه من الممكن رسم بيان لبصمة أي صوت، فمثلا عندما كنا نحـاول توليـف الصائت (ɔ:) كما في caught عن طريق تصويـــت شـوكتين رنـانتين كمـا في الشـكل 3-5، كان بإمكاننا رسم بيان للوضع في النموذج المبين في الشكل4-3 فالموجة المركبـة التي قمنا بتوليفها، ذات مكونين، أحدهما موجة بتردد 100 هيرتز (التردد الأساسي) والآخر موجة بتردد 500 هيرتز (التوافق / التجاوب الخامس للـتردد الأساسـي).إن هذه المعلومات متوفرة في الشكل 4-3، وبالمثل نستطيع رسم شكل يمثل عناصر الموجة المركبة التي يحدثها البيانو، فالنغمة c تحت النغمة c الوسطى، والتي أوضحنا شكلها في الرسم الطيفي 3-1 يمكن وصفها وفقا للرسم الطيفي المبين في الشكل 4-4 وهذا يعني أن الموجة المركبة تتألف من تردد أساسي وعدد كبير من التوافقيــات (harmonics)،

وبصرف النظر عن التوافقين الخامس عشر والسادس عشر المفقودين، أو ضعيفين بصورة لا يظهران فيها بوضوح، فإن جميع التوافقيات حتى الثامن عشر تقوم بدور في إنشاء الموجة المركبة، لاحظ أن مقياس التردد فقط هو الوحيد المدَرج في جميع الرسومات، ولا تظهر علامات للدلالة على قيم مطلقة مميزة للسعات لأن شكل الموجة المركبة يحدد بالقوَة النسبية للمكونات، عندما تزداد سعة موجة مركبة (أي، عندما يصبح الصوت أعلى (louder)، فإن سعات جميع المكونات تكون قد ازدادت بنفس النسبة.



شكل 4-4 طيف الشكل الموجي الموضح في شكل 3-1 حرف C أسفل C الوسطى على البيانو.

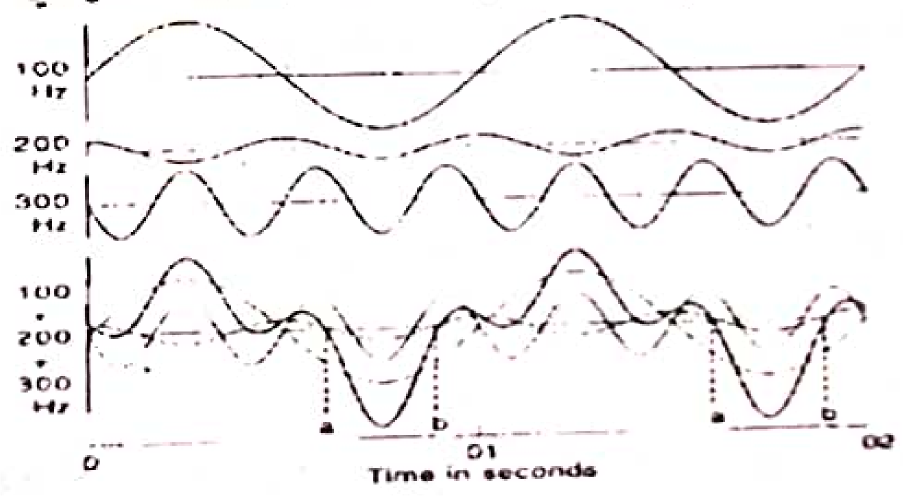
إن رسما بيانيا لطيف صوت يهمل بعض المعلومات الموجودة في الموجة المركبة، في بعض الحالات هذا تبسيط، حيث أنه لا ينبئنا بكل شيء حول الطريقة التي تندمج فيها المكونات. في الشكل 1،4 رسمت المكونات بحيث أن مكونات الموجة كانت على وشك أن تسبب زيادة في الضغط عند النقطة التي يبدأ عندها الرسم البياني، ولكن افترض الآن أن النغمات النقية (التي ربما تمثل أصواتا مصاحبة لشوكات رنانة) لم تندمج معا بهذه الطريقة. إذا كنا نفكر في ضوء الموجة التي صنعناها، فإنه من المقنع تماما بأن إحدى الشوكات الرنانة ابتدأت رنينها قبل

الأخريات.وبالتالي، في الوقت الذي اقتربت من بعضها (والذي يمكن أن يعتقد بأنه الوقت صفر على الرسم البياني)، ربما يكون الوضع كما في الشكل4-5.

وهنا عند نقطة البدء في الرسم البياني، الشوكة الرنانة ذات التردد الأخفض على وشك أن تسبب زيادة في الضغط، الشوكة الثانية تنتج موجة على وشك أن تنحدر من قمة أقصى ضغط، والشوكة الثالثة على وشك أن تسبب نقصانا في الضغط. إذا دمجنا الآن اختلافات الضغط، كما فعلنا في حالات سابقة، الموجة المركبة الناتجة تكون كما هو موضح. عند أي لحظة ضغط الموجة المركبة هو إضافة أو طرح ضغط المكونات، مثلا، في الزمنين

(β) و(A) التنوع من ضغط الهواء الطبيعي هو صفر، لأنه عند هذه النقاط، تغيرات الضغط الناتجة عن مكونات الموجات تلغى بعضها بعضاً.

إن شكل الموجة المركبة هذا يعيد نفسه مائة مرة في الثانية، ومن هذا القبيل يمكن اعتباره ذات الشيء كما في الموجة في الشكل 4-1، ولكن من نواحي أخرى تبدو هذه الموجات مختلفة جدا. إلاّ أن كل واحدة منها تمتلك مكونات بنفس الترددات والسعات. أما الاختلاف فيرجع إلى الطريقة التي تندمج من خلالها هذه المكونات. هذا الاختلاف في توقيت المكوّنات يعرف بالطور الاهتزازي (phase).



شكل 4-5 توليف موجات ترددانها 100 هرتز، و200 هرتز، و300 هرتز وهو مزيج مختلف عن المزيج في الشكل 4-1 بالنسبة للزمن وعليه، فإن الموجة الناتجة موجة مركبة مختلفة.

لأن الموجات في الشكل 4-1،4-5 يمكن تحليلها إلى نفس المكونات فإن الرسومات لأطيافها ستكون نفسها. إن طيف الصوت يبين فقط الترددات الموجودة و باي سعات هي، ولا تحدد عادة الطريقة التي تندمج فيها معا. وعلى ذلك، الشكل 4-2 هو الطيف المطابق لكلتا الموجتين في الشكل 4-1 وتلك في الشكل 4-5، بما أنه يظهر بوضوح صوتا بتردد أساسي 100 هيرتز متحد مع توافق ثان ب3/ 10 من سعة التردد الأساسي وتوافق ثالث ب 3/ 5 من سعة التردد الأساسي.

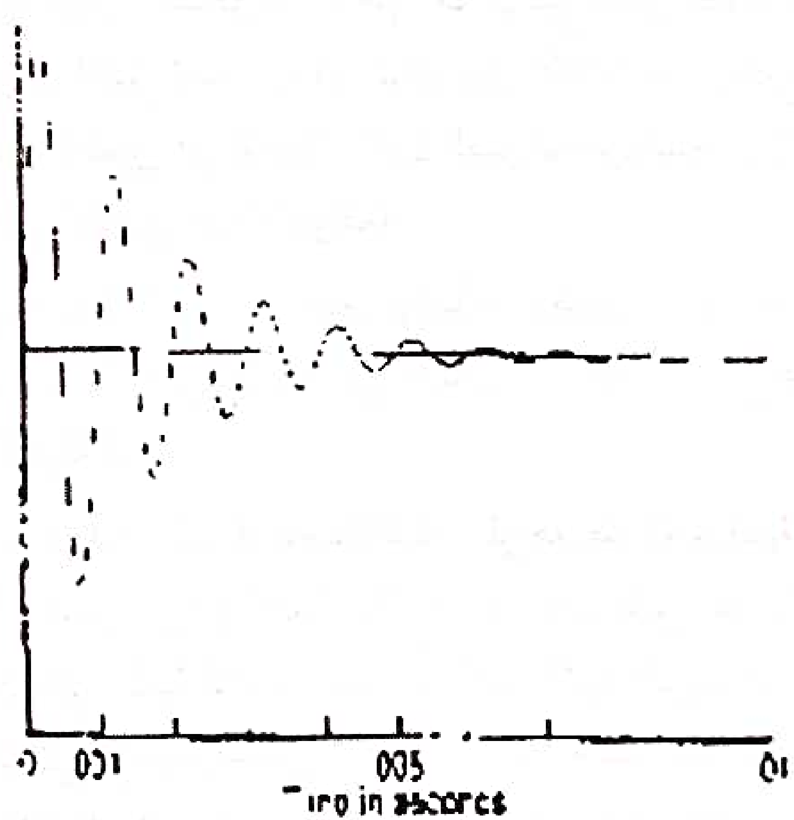
إنه من الممكن تصنيع نغمات نقية والتي ربما تتحد لتعمل أي من أشكال الموجة المطابقة للرسم الطيفي الموضح في الشكل 4-2. استخلصت هذه الإيضاحات بواسطة كمبيوتر بإمكانه إنتاج أصوات تماما بسهولة كما في الإيضاحات البيانية، حتى أنه من الممكن تبديل طريقة دمج النغمات النقية، حيث يتغير نمط الموجة في الشكل 4-1 ببطء إلى ذلك النمط في الشكل4-5، مارا خلال تنوع من أنماط موجية أخرى. الشيء المدهش هو أن آذاننا تسمع ولكن دون تمييز الاختلاف بين جميع هذه الأنماط الموجية. طالما المكونات تبقى هي نفسها، يكون الصوت هو نفسه. و إذا استثنينا بعض الحالات الخاصة التي تتضمن أصواتا مرتفعة

(والتي من المحتمل أن تكون غير مرتبطة بموضوع الصوتيات) فإن نوعية الصوت لا تعتمد ببساطة على الطريقة التي اتحدت فيها المكونات بل على ترددات و سعات الموجات المكونة لها).

بإمكاننا الآن أن نرى لماذا لا يزودنا شكل الموجة بطريقة مرضية لوصف نوعية صوت ما. يمكن أن نعتبر صوتين أنهما متطابقين لأن لهما نفس المكونات، ولكن على الرغم من ذلك قد يكون لهما أنماطاً موجية مختلفة،وعلاوة على ذلك، من الممكن لأي صوت أن يمتلك شكل موجة واحد في وضع معين، ويمتلك نمط موجة مختلفة في مناسبة أخرى (مثلا، الصائت (i) كما في see، من المفترض أن نسمع كلا الصوتين على أنهما نفس الصائت على شرط أن تكون مكونات هذه الموجات المختلفة هي نفسها. وعليه من الأفضل في غالب الأحيان تمثيل الصوت برسم يوضح طيفه بدلاً من رسم بياني يمثل شكل موجة ذلك الصوت.

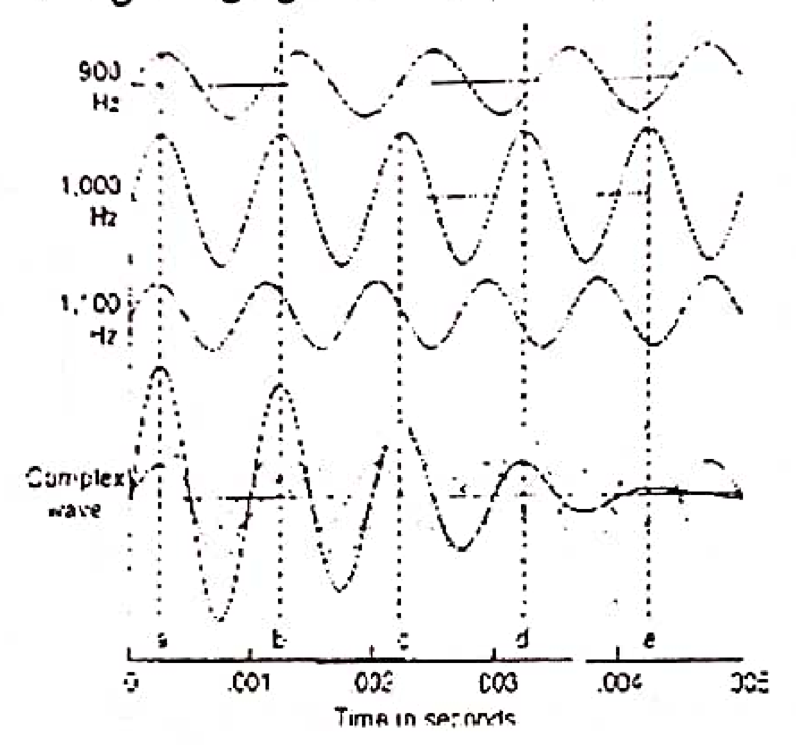
فالصورة الطيفية للصائت (i) كما في see ستبقى دائما نفسها طالما بقيت المكونات هي نفسها.

فيما مضى كان كل تحليلنا لأصوات بترددات محددة منتظمة، ولكنه من الممكن أن نحدد الرسوم الطيفية لأصوات بأنماط موجية لاتكرارية، كتلك الموضحة في الشكل 4-6.يمكن تحليل هذه الموجة إلى عدد من النغمات النقية (والتي هي بالطبع موجات منتظمة) بنفس طريقة أنماط الموجة التكرارية التي نحن بصددها في هذا الفصل حتى الآن. إذا دققنا النظر في نمط الموجة في الشكل 4-6، نرى أنه طالما أن الصوت مستمر في البقاء على الوجود تحدث قمم الضغط في كل جزء من الألف من الثانية، وبالتالي، نتوقع أن نجد مكونا واحدا لهذا الصوت له تردد قيمته 1000 هيرتز، وكل ما يبقى علينا إيجاده بالإضافة إلى ذلك بعض المكونات التي ستسبب نقصان سعة الموجة درجة بدرجة.



شكل 4-6 شكل موجي غير متكرر تحدث فيه قمم الضغط بمعدّل 1000 هرتز في الثانية طالما أن الصوت مستمر في البقاء.

في النهاية إذا أضفنا إلى موجة ال 1000 هيرتز مكونا واحدا بتردد أعلى بصورة طفيفة ومكونا آخر بتردد أقل، فإننا نحصل على شيء كالنتيجة التي نرغبها،هاتان الموجتان مضاف إليهما موجة الألف هيرتز موضحتان في الجزء الأعلى من الشكل 4-7. تمتلك إحداهما ترددا قدره 900 هيرتز والأخرى ترددا قيمته1100 هيرتز، و كلتاهما بسعة تعادل نصف سعة الموجة ذات 1000 هرتز، أن حصيلة دمج الموجات الثلاث لفترة زمنية محددة موضحة في الجزء الأسفل من الشكل4-7.

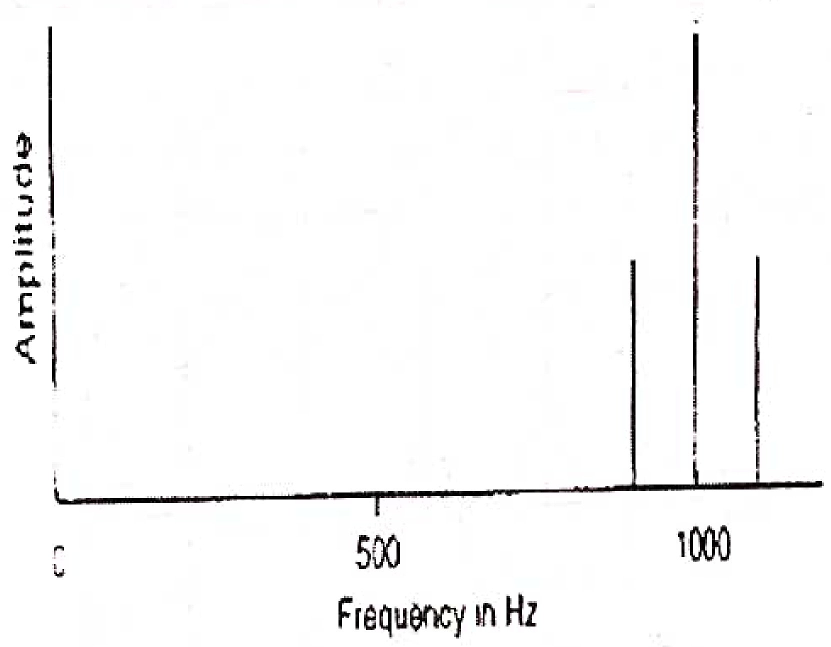


شكل 4-7 موجة مركبة من توليف 1000 هرتز، 1100 هرتز، و900 هرتز.

وكما يمكن رؤيته في الشكل، عند الزمن a كلتا الموجتين تساندان مكون الألف هيرتز لزيادة الضغط. ونتيجة لذلك تصبح قمة الضغط الأولى كبيرة نوعا ما. عند الزمنb. كلتاهما تساندان، ولكن ليس كثيرا، لذا القمة الثانية أصغر نوعا ما. في الزمن c كتلاهما تلغي إحداهما الأخرى. كون نتيجة دمجهما تسبب فقط زيادة طفيفة في قمم الضغط وذلك يرجع إلى تأثير موجة الألف هيرتز وحدها، عند الزمن d تسببا نقصانا صغيرا في الضغط الأقصى، هذا التأثير يعزز عند الزمن e، عندما تسببان انخفاضا معقولا في قمم الضغط. هذه الأمواج الثلاث يمكن أن تندمج لفترة قصيرة لإحداث موجة مشابهة لشكل الموجة التي نأمل تحليلها.

في الشكل 4-6 ربما أمكننا وصف الموجة بأنها تمتلك رسما طيفيا مشابه لذلـك في الشكل 4-8.

أي كونه مؤلف من نغمات نقية بـترددات 900 هـيرتز، 1000 هـيرتز، و 1100 هيرتز،وكل نغمة منها لها نصف سعة الموجة ذات التردد1000 هيرتز، وعلى كل حال، هذا ليس صحيحـا تمامـا لأن الموجـة المركبـة في الشـكل4-7 ليسـت بـالضبط نفسـها كالموجة في الشكل4-6.

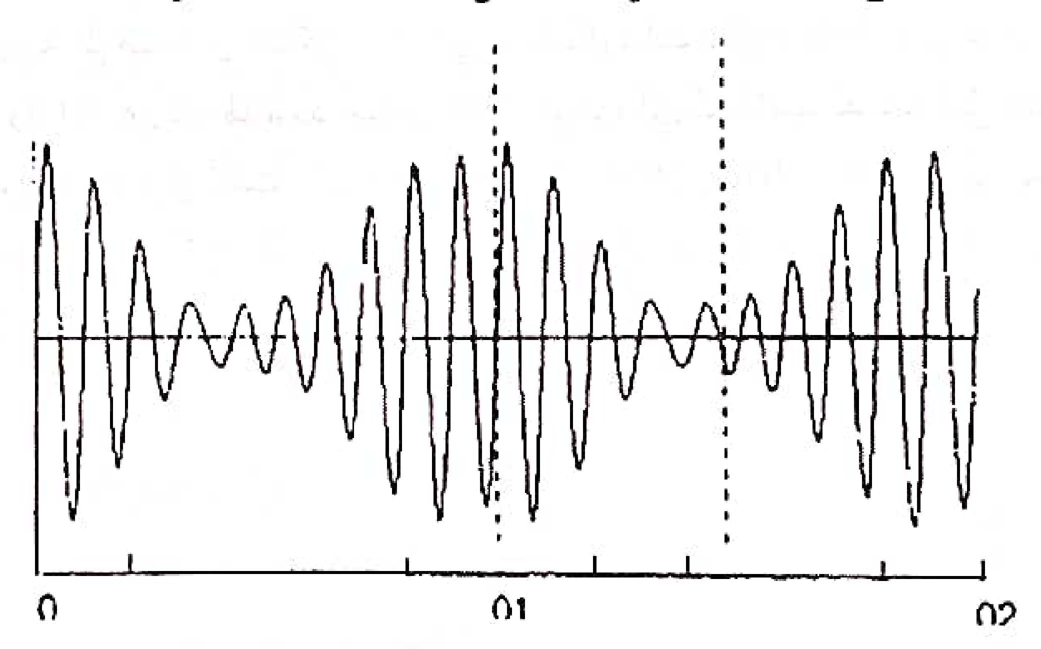


الشكل 4-8 طيف الموجة المركبة في الشكل 4-7.

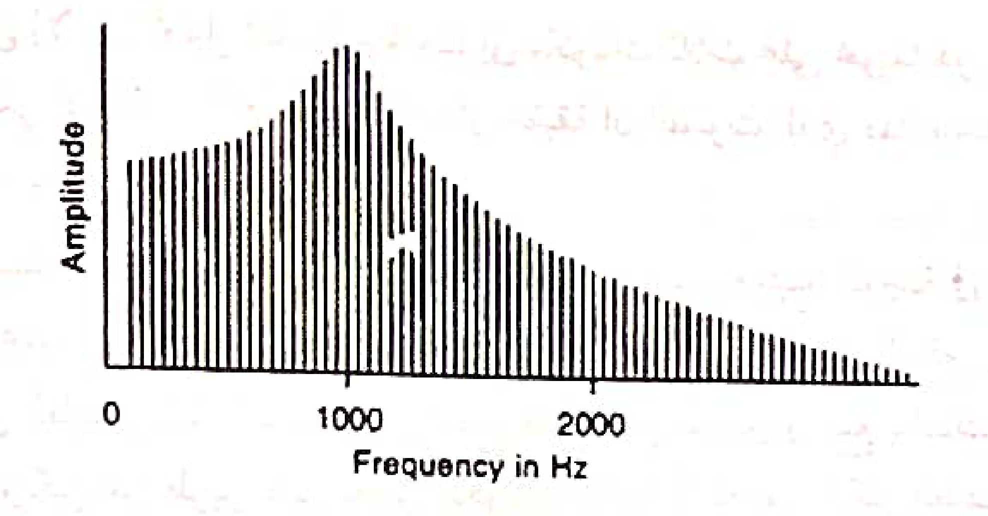
الصوت الأخير بدأ فجأة، على افتراض من السكون،ومن ثم بـهت ومـن ثـم السكون مرة أخرى، على سبيل الافتراض. ولكن الموجات المكونة التي يجب إضافتـها معا لعمل موجة مركبة في الشكل 4-7هي جميعا نغمات نقية، بمـا معنـاه أن كـل دورة تشبه الدورة التي تليها، وهكذا من الناحية النظرية إلى ما لا نهايـة، ولكـن، إن كـانت النغمات النقية الـتي أشـرنا إليـها في الشـكل4-7، قـد تم دمجـها بفـترة زمنيـة أطـول، ستستمر في إنتاج نمط موجة كما يبدو في الشـكل 4-9. كـانت الموجـة في شـكل 4-6 هي تقريباً نفس ذلك الجزء من الموجة المركبة بين الخطوط المنقوطة. وعليه فإن القـول بأن نمط الموجة تلك له هذا الطيف المبين في الشكل4-8 مـا هـو إلا قـول قريـب من

الحقيقة ليس إلا. إن تحليل نمط الموجة هذا إلى مكونات ثلاث على نحو ما هو مبين في الرسم الطيفي لا يخفي الأخذ بعين الاعتبار حقيقة أن الصوت الذي قمنا بتحليله له بداية فجائية يتبعها سكون.

إذا قمنا بغض بعض النظر عن السكون الذي يسبق ويتبع الموجة في الشكل 4-6 بقي علينا أن نحلل شكل الموجة إلى عدد كبير من المكونات (في الواقع إلى ما لا نهاية). من الطبيعي أننا لا نستطيع إيضاح هذا عن طريق وضع بيانات لجميع المكونات، ولكن عن طريق تمثيل بعض المكونات يمكننا أن نضمن شكل الطيف الذي ستنتجه (الشكل 4-10). إن الطريقة الأكثر شيوعا لوضع رسوم بيانية لتلك المكونات هي طريقة رسم المنحنى كما هو مبين في الشكل 4-11. عندما نمثل صوتا عن طريق منحنى من هذا النوع، فذلك يعني أنه يمثل موجة مركبة بعدد غير محدد من المكونات،إن ارتفاع المنحنى عند أي نقطة يمثل السعة النسبية للمكون بذلك التردد.

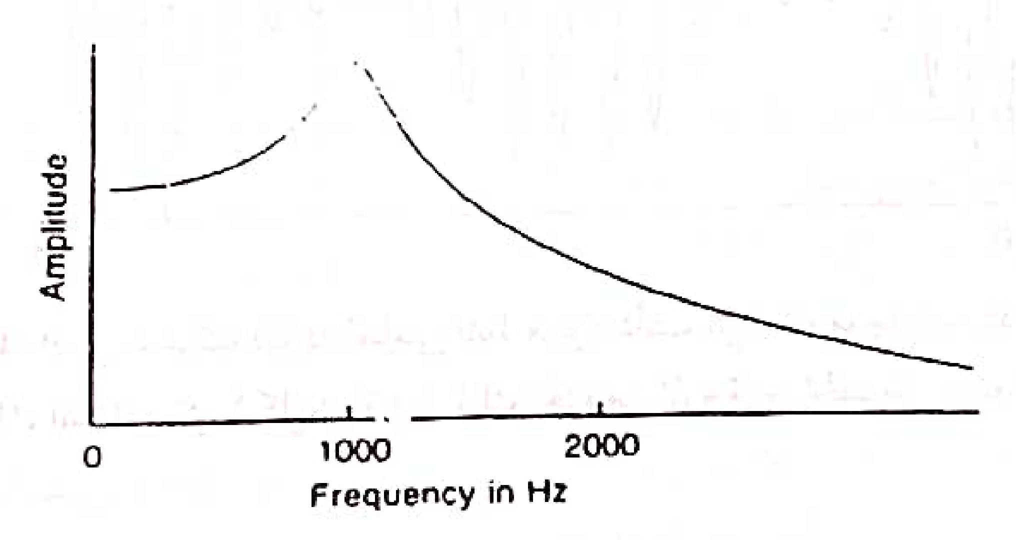


شكل 4-9 موجة مركبة (بتردد أساسي 100 هرتز) تتألف من ثلاثة موجات بترددات 900، 1000، 1100 هرتز. شكل 4-7 يبين ذلك الجزء من الموجة بين الخطوط المتقطعة فقط.



شكل 4-10 شكل تقريبي لطيف الموجة الصوتية الموضح

إنه خارج نطاق هذا الكتاب وضع تفسير رياضي يوضح لماذا يوجد عــدد غـير محدود من المكونات في طيف الموجة اللاتكرارية. على أية حال، ربما نلاحـظ بالمناسـبة بأن الموجة الموضحة في الشكل 4-9 التي لهـا مكونـات بـتردد 900 هـيرتز و 1000 هيرتز و1100 هيرتز، لها تردد أساسي 100 هيرتز، أي أنها تعيد نفسها كـل جـزء مـن مائة من الثانية، ولو كانت المكونات 900، 950، 1000 ، 1050 ، 1100 ، أي بترك حيز 50 هيرتز لكان التردد الأساسي 50 هيرتز، حيث يكرر شكل الموجة كـل جـزء مـن خمسين في الثانية.



شكل 4-11 الطريقة المعتادة لتمثيل الطيف ذو الشكل الموجي غير التكرر.

إذا أضفنا مكونات أكثر، بحيث تكون التباعد بينهما 1 هيرتز بترددات 900، 901، 902، 903،......، 1096، 1097، 1098، 1099، و1100 هيرتز، نجد بأن الموجة المركبة المنتجة لها تردد أساسي هو 1 هيرتز،إذا أردنا عمل موجة مركبة تعيد نفسها بصورة أبطأ، علينا إضافة ترددات مكونات أخرى لترددات أقرب لبعضها البعض.إذا كان نمط الموجة يحدث مرة واحدة فقط في مقدار لا متناه من الزمن، أي أنه لا يعيد نفسه أبدا، إذا يجب أن تكون المكونات قريبة من بعضها بشكل غير محدود.

الطيوف الموضحة في الشكل 4-10 و4-11 لها قمم عند 1000 هيرتز، كما يمكن توقعه لنمط موجة يميل لأن يتكرر كل جزء من ألف من الثانية، لاحظ أيضا بأن تلك الأطياف غير متماثلة، المكونات التي تقل تردداتها عن 1000 هيرتز لها سعة أعلى من تلك المكونات التي تزيد تردداتها عن 1000 هرتز بأبعاد متساوية، وهذه السعات الأكبر توازن بواسطة عدد أكبر من المكونات التي تزيد تردداتها عن 1000 هيرتز.

لقد أشير في نهاية الفصل السابق إلى أن معظم الأصوات التي درسناها ليست أنماطا موجية لا تكرارية مسبوقة أو متبوعة بسكون، ولا هي موجات تتكرر بانتظام معين للتكرار، بدلا من ذلك إنها تتألف من موجات أقل أو أكثر شبها بالموجات السابقة واللاحقة. إن درجة التشابه تعتمد على معدل تغير النوعية، بعض أصوات الكلام مثل الصوائت التي تستمر إلى وقت طويل نسبيا، تحوي عددا من الموجات المتعاقبة والتي غالبا تطابق إحداها الأخرى. بعض أجزاء الكلمات الأخرى، مثل الاستهلال المفاجئ والانتهاء المفاجيء في كلمة Peak، مؤلف من أصوات تتبدل أشكال الموجة الخاصة بها بسرعة جدا.

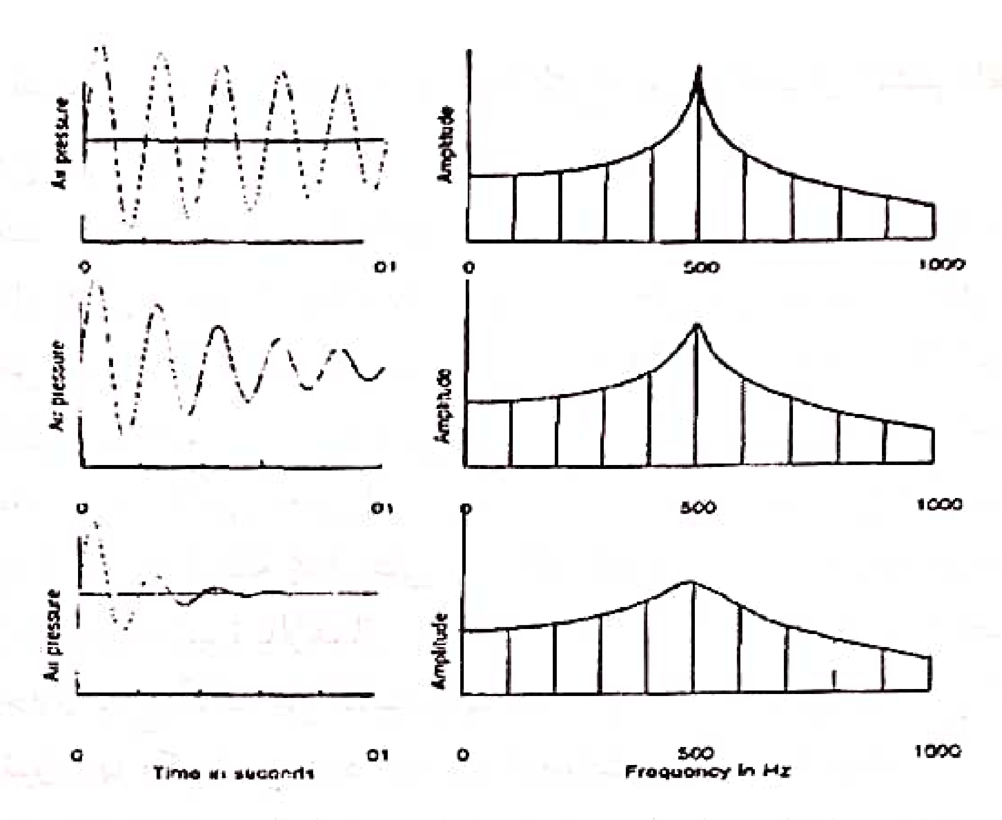
عندما نصف موجة صوتية بتحليلها إلى مكوناتها، يمكننا افتراض بأنها واحدة من عدد لا متناه من الموجات المتطابقة (هذا ما قمنا به في تحليلنا الأول للموجة المركبة)، أو يمكننا الافتراض بأنها تنوع ضغط منعزل، مسبوق ومتبوع بسكون (والذي، كما رأينا يقودنا للاستنتاج بأنها تمتلك عددا لا محدود من المكونات)

عندما نحلل موجة صوت من عدد متشابه من الموجات المتتابعة، فإننا عادة نستخدم الطريقة الاولى، عندها يقال بأن الصوت له طيف خطي، من ناحية أخرى،

عندما تكون كل موجة مختلفة عن الموجات المجاورة، عادة تحلل باستخدام الطريقة الثانية، وعندها يقال بأن الصوت له طيف استمراري.

فيما تقدم، قلنا بأنه من الملائم أن نعتبر أن جميع الأصوات تنتمي إلى واحدة أو أخرى من فئتين، الفئة الأولى لها أشكال موجية تعاود الحدوث في فترات منتظمة، والأخرى لها أنماط لاتكرارية. يمكننا الآن أن ندرك كيف تم هذا التمييز عمليا، عادة نعتبر أن للصوت نمط تكراري مقابل نمط مؤلف من تنوعات عشوائية في الضغط، إذا كان من الملائم وصف ذلك الصوت بواسطة الطيف الخطي مقارنة بالطيف الاستمراري. من وجهة نظر رياضية محضة فإن جميع الأصوات يجب أن توصف كما لو أنها تمتلك أطيافا استمرارية، لأنه، في الواقع، جميع الأصوات لها أنماط موجية لا تكرارية إذا توخينا الدقة في الكلام. ولكن العديد من الأصوات لها أشكال موجة قريبة جدا من النمط التكراري بحيث نجد من الملائم أن وصفها يكون أفضل طبقا لقواعد رسم الطيف الخطي. عندما نحلل موجة تكرارية بهذه الطريقة، نحصل على وصف مبسط تحدد بدقة من خلاله المكونات الأكثر أهمية، ولا يهمل إلا عدد قليل من المكونات الثانوية.

يوضح الشكل 4-12 تحليل عدة أمواج تمثل النمطين الرئيسين لأشكال الموجة الصوتية، ثلاث موجات مختلفة مبينة على يسار الرسم البياني، والرسم الطيفي المطابق لكل منها على اليمين. تمثل الخطوط العمودية في الصورة الطيفية المكونات التي يمكن اعتبارها موجودة إذا لم تكن الموجة المطابقة زوجا من الدورات أعيد تكرارها عدداً لا نهاية له من المرات، بل هي دورة كانت تكرر عددا لا محدودا من المرات. المنحنيات المنقوطة في الرسوم البيانية لصور الطيف تمثل نتائج الشكل الثاني من التحليل، حيث اعتبرنا واحدة من هذه الدورات تنوعا معيناً في الضغط مسبوق ومتبوع بسكون.



شكل 12-4 موجات مختلفة وطيوفها.

الموجة الموضحة في أعلى الشكل 4-12هـي تقريبا نغمة نقية، هناك نقصان صغير في السعة بين القمة الأولى والتالية، وعندما تبدأ الدورة الثانية، سعة القمة في هذه الدورة ليست أكبر بكثير من سعة القمة السابقة في الدورة الأولى، وبالتالي، كما يمكننا رؤيته من الطيوف الخطية، فأن قدراً كبيراً من طاقة الموجة المركبة يدخل ضمن مكون واحد عند تردد 1000هيرتز. كما أن المكونات الإضافية التي يجب أن تدمج معه لها سعات صغيرة جدا، ونستخلص معلومات مشابهة بطريقة أخرى من الطيف الاستمراري الذي يمكننا أن نرى من خلال حدة المنحنى أن معظم الطاقة تتركز في منطقة تردد واحد.

الموجة الثانية في الشكل 4-12 لها معدل تلاشي أسرع إلى حد ما، يبين رسمها الطيفي الخطي أنها مكونة من عدد أكبر من النغمات بسعات مقبولة، أو كما نشاهد في شكل المنحنى الطاقة ليست متركزة في نطاق تردد ضيق. الموجة الثالثة تتلاشى بسرعة قصوى. إن سعات القمم في الدورة الأولى في الواقع صفر، بالضبط قبل أن تبدأ الدورة الثانية. إن عددا كبيرا من المكونات ذوات السعة المتساوية تقريبا مطلوبة

من أجل تصنيع شكل موجة مركبة من هذا النوع، بعبارة أخرى تنتشر الطاقة فوق مدى واسع من الترددات.

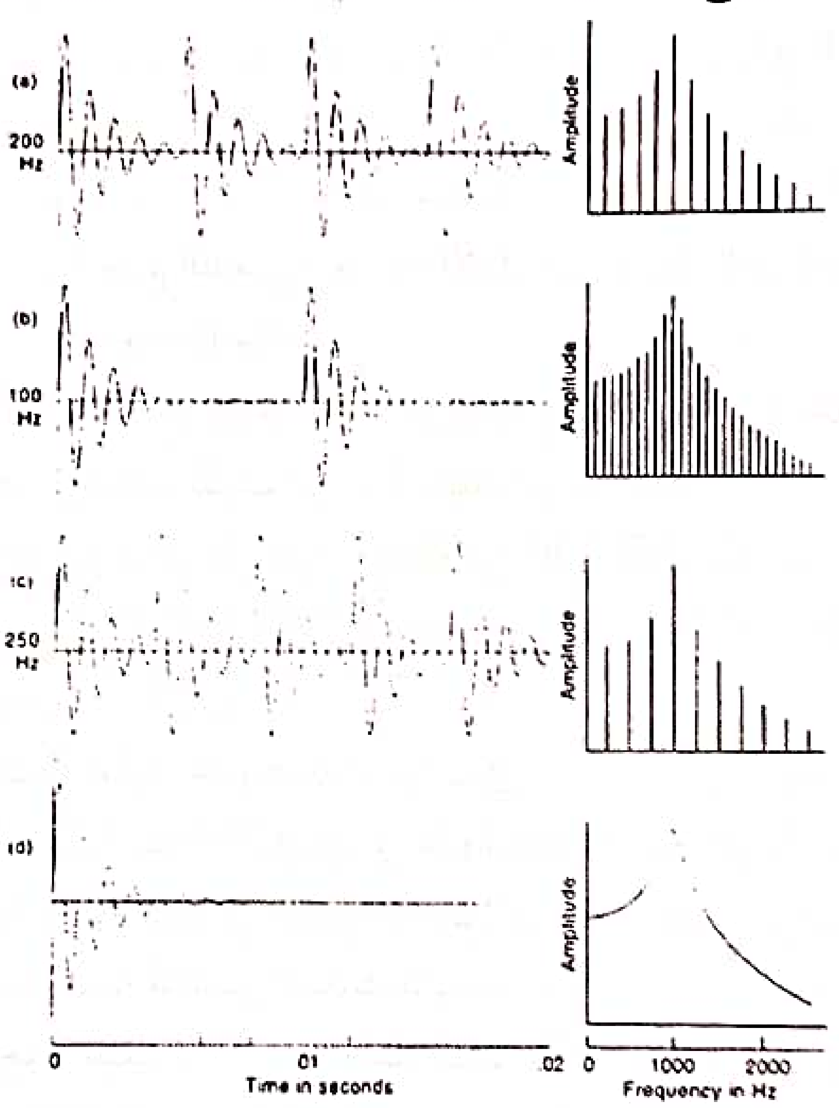
يمكننا الآن أن ندرك سببا واحدا لماذا نستطيع اعتبار نغمة الشوكة الرنانة نغمة نقية. معدل تلاشي الشوكة الرنانة بطيء جدا أبطأ حتى من الموجة الأولى في الشكل 4-12 ، من الممكن طرق شوكة رنانة بنغمة A (440 هيرتز) بحيث تستمر لعدة ثوان،وبالتالي إنها تعمل آلافا كثيرة من الذبذبات، كل منها تقريبا نفس السابقة، كل اهتزاز يتخذ شكل المنحى الجيبي المرتبط عادة بموجة الجيب المعروقة. وعليه، فإن شكل موجة الشوكة الرنانة يحلل على أنه شكل يحتوي على نغمة نقية مهيمنة واحدة وبمكونات إضافية جديرة بالإهمال. العديد من أصوات الكلام، من جانب آخر، تتلاشى خلال بضع آلاف من الثانية. إنها تشبه الموجة الثالثة في الشكل 4-12وعند التحليل تبين أنها مكونة من عدد كبير من النغمات بسعات متشابهة.

القاعدة العامة التي يجب تذكرها هي أن المنحنى الحاد (sharp pointed curve) يمثل الرسم الطيفي لصوت يتلاشي ببطء. حيث أن الطاقة تتركز في هذا الصوت في نطاق تردد واحد، فهو تقريبا نغمة نقية. من جهة أخرى شكل الموجة اللاتكراري بمعدل سريع للتلاشي يمثلها منحنى أكثر انبساطا (flatter curve)، الأمر الذي يدل على أنها تحتوي على طاقة تنتشر فوق نطاق أوسع من الترددات.

يتألف كثير من أصوات الكلام من تكرارات منتظمة لدورة من التنوعات في ضغط الهواء والتي تشبه نوعا ما تنوعات الضغط في الشكل 4-12 في ذلك الوقت، لاحظنا أنه على الرغم من ظهور زوجين من الدورات، يمكن اعتبارها على أنها تمثيل لدورة واحدة كررت عددا من المرات، يبين الشكل4-13 ثلاث موجات أخرى من هذا النمط، إضافة إلى موجة

رابعة ربما اعتبرت كما لو أنها مسبوقة ومتبوعة بسكون. إذا ما مثلت هذه الموجة الرابعة الصوت المحدث بواسطة ضربة على كمية من الهواء، فستمثل الموجات الاخرى الأصوات التي تنتج عن سلسلة من الضربات التي تحدث في فترات زمنية منتظمة، كما سنرى لاحقا، هذه النقرات " taps "تطابق في أصوات الكلام الفتح والإغلاق المنتظم للأوتار الصوتية.

الموجة التي في أعلى يسار الشكل 4،13 لها تردد أساسي هو 100 هـيرتز، كما ترى على مقياس الزمن في أسفل الشكل، تحـدث الـدورة الواحـدة خـلال. 01 مـن الثانية، وتتضمن كل دورة هنالك ست قمم موائمة لموجـة لهـا سـتة أضعـاف الـتردد الأساسي، لذلك نتوقع أن تكون سعة المكون ذي التردد 600 هيرتز عالية نسبيا.



شكل 4-13 موجات وطيوفها

سابقا في هذا الفصل رأينا عند تحليلنا لموجة متكررة بهدف الحصول على طيف خطي، نجد بأن جميع المكونات لها ترددات عبارة عـن مضاعفـات كاملـة مضروبـة في عدد صحيح للتردد الأساسي للموجة المركبة، لذا في حالـة الموجـة الأولى في الشـكل 4-13 ، المكونات المحتملة هي نغمات بترددات 100، 300،200 000هيرتز.

الرسم الطيفي الفعلي لهذه الموجة مبين على يمين الشكل . المكـون الأكـبر كمـا هو متوقع هو المكون ذي تردد 600 هيرتز.

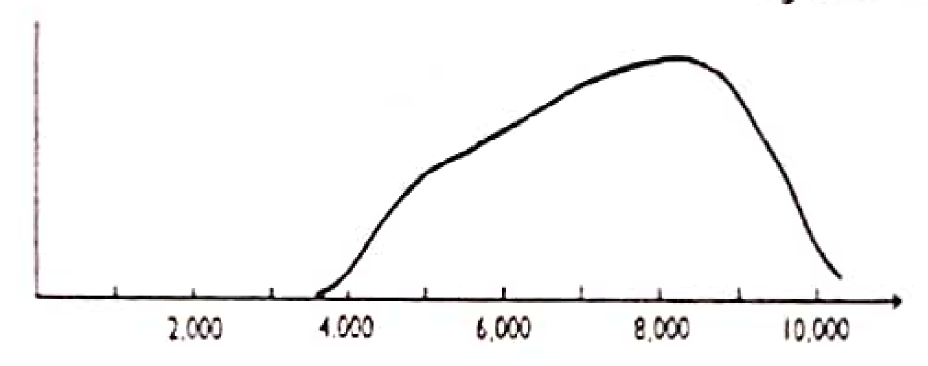
قمم مشابهة تعاود الحدوث كل 1/ 600 من الثانية في الموجة في أسفل الشـكل 4،13، لكن حيث اعتبرت هذه الموجـة مسبوقة وملحوقـة بسـكون، فتحلـل طبقاً للرسم الطيفي الاسـتمراري. في هـذا الرسـم الطيفـي تماما كمـا في الرسـم الطيفـي للموجة الأولى، المكون ذو السعة الأكبر له تـردد 600 هـيرتز. وبالإضافـة إلى ذلـك، هنالك أوجه تشـابه أخـرى بـين أطيـاف هـاتين الموجتـين، السـعات النسـبية لجميع المكونات الـتي في الرسـم الطيفـي للموجـة الأولى هـي ذاتـها مثـل السـعات النسـبية للمكونات المطابقة للموجة السابقة.

عندما ندقق النظر في الموجتين الثانية والثالثة في الشكل 4-13، نجد بأن أطيافـها متشابهة في بعض الجوانب لطيف الموجة السابقة. الموجة الثانيـة (b) شـكل موجـة مركبة تعاود الحدوث مرتين كل جزء من مائة من الثانية بالتالي فإن لهـا تـردد أساسـي قيمته 200 هيرتز، وتوافقات في أطيافها عبـارة عـن أضعـاف 200 . التوافـق الثـالث يشكل القمة في الرسم الطيفي

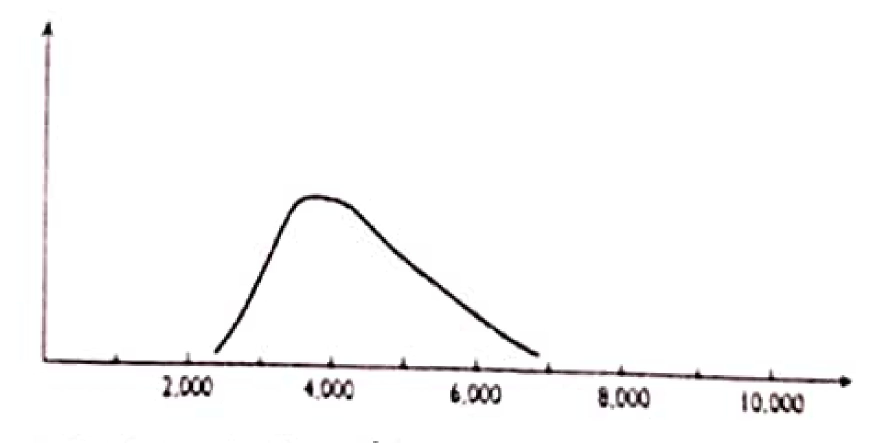
الموجة الثالثة تعاود الحدوث ثلاثة مرات في كل. 02 مـن الثانيـة، الأمـر الـذي يعطيها ترددا أساسيا قيمته 150 هيرتز. في هذه الحالة، فإن التوافق الرابـع هـو الـذي يشكل القمة عند 600 هيرتز في الرسم الطيفـي. وكمـا في حـال الموجـات الأخـرى، جميع المكونات الموجودة لها نفس السعات النسـبية في الصـورة الطيفيـة. يمكننـا رسـم منحنى مشابه حول طيف كل من الموجات الثلاث الأولى، وعلاوة علـى ذلـك، هـذا المنحنى له نفس شكل الرسم الطيفي للموجة السـابقة، وهـو حـدوث منعـزل لنمـط موجة مشابه لأشكال الموجة التكرارية المحتواه في كل من الموجات الأخرى.

ستكون هذه النتيجة مهمة لنا عندمـا نـاتي إلى دراسـة كيـف تسـتمر الصفـات المميزة للصوت في المحافظة على سماتها الأساسية (phonetic quality) على الرغـم من التنوعات في درجة الصوت والتي هي بالطبع معتمدة على التردد الأساسي.

ربما ننهي هذا الفصل بدراسة المكونات التي يجب أن ندمجها من أجل عمل أنماط موجة غير منتظمة تحدث أثناء النطق بالأصوات في نهاية الكلمات hiss و hush. إذا ما استمعت إلى هذين الصوتين فإنك ستشعر بان كلاهما ينقل نفس الإدراك الحسي لدرجة الصوت، كلاهما له طاقة تنتشر فوق مدى واسع من الترددات، ولكن في أي من الحالتين لا تنقسم تماما بشكل متماثل ضمن مكونات التردد. إن صورها الطيفية مبينة في الشكل4-14،4-15 في الصوت في نهاية الكلمة hiss معظم مكونات الترددات بأي سعة مقبولة متمركزة فوق 6600 هيرتز. الصوت في نهاية الكلمة hush يتوزع تركيز طاقته في نطاق 3000 هيرتز إلى 4500 هيرتز، ولهذا السبب فإننا ندرك سماعاً ان لهذا الصوت درجة صوتية اقل من الصوت السالف ذكره.



شكل 4-14 طيف الصوت للصامت [S] في آخر الكلمة Hiss، وفي هذا الشكل كما في الأشكال الأخرى، يشير الخط الأفقي إلى التردد، والخط العمودي يدل على مقدار الزحزحة الوضعية (السعة) للمكونات.



شكل 4-15 طيف الصامت الأخير (ش) في الكلمة hush.

تماما بشكل متماثل ضمن مكونات التردد. إن صورها الطيفية مبينـة في الشـكل 4-14، 4-15 في الصوت في نهاية الكلمة hiss معظم مكونـات الـترددات بـأي سـعة مقبولة متمركزة فوق 6600 هيرتز. الصوت في نهاية الكلمة hush يتوزع تركيز طاقتـه في نطاق 3000 هيرتز إلى 4500 هيرتز، ولهذا السبب نـدرك سماعـاً إن لهـذا الصـوت درجة صوتية اقل من الصوت السالف ذكره.

الفصل الخامس

الرنين

الفصل الخامس

الرنين

في الفصول القليلة الآنفة كان التركيز منصبا على تحليل الأمواج الصوتية اكثر منه على منتجاتها ويجب علينا الآن دراسة بعض خصائص مصادر الأصوات.

جميع مصادر الأصوات هي أجسام متحركة، بعضها كما في الشوكات الرنانة، وأوتار البيانو لها ميل طبيعي للاهتزاز، وعندما تطرق مرة تبدأ بالاهتزاز بمعدل ثابت (أو تردد محدد) لوقت معقول. بعض مصادر الأصوات الأخرى لديها ميل أقل للاهتزاز من مثل الطبول وأسطح الطاولات، فهي تحدث ضجة عندما تطرق، لكن اهتزازها يتلاشى بسرعة. ومصادر أخرى كالأجزاء الخاصة بالسمع في جهاز التلفون (الهاتف) ومكبرات الصوت ليس لها تقريباً تردد طبيعي أو ذبذبة، إذ يتحكم في كل حركة فيها للخلف أو للأمام تيارات كهربائية.

إنه من الممكن بالطبع أن نجعل جسما مهتزاً يسبب اهتزازات في جسم آخر، وهذا يحدث عندما توضع قاعدة شوكة رنانة على الطاولة، إنك إذا طرقت شوكة رنانة ومن ثم أمسكتها بيدك أثناء اهتزازها، فإنها تحدث صوتا خفيضا فقط، ولكنك ما إن تضع قاعدة الشوكة الرنانة على الطاولة، يصبح الصوت أعلى كثيرا. إن الشوكة الرنانة لا يمكنها إحداث تنوعات كبيرة في ضغط الهواء لأن شعب الشوكة الرنانة صغيرة نوعاً ما، وكذلك الهواء بدلا من كونه مضغوطا، يمكنه الحركة بسهولة حول جوانب الشعب،ولكن عندما توضع قاعدة الشوكة الرنانة على طاولة، فإن اهتزازات الشوكة تنقل إلى الطاولة، التي تهتز بدورها، عندها فإن كمية أكبر من الهواء سوف تتأثر. الطاقة التي تبذلها الشوكة الرنانة في اهتزازها تتحول إلى موجات صوتية، وبشكل أكثر فعالية عن طريق سطح الطاولة المتسع والمنبسط.

هذا المبدأ مطبق في كثير من الآلات الموسيقية، فـالوتر المـهتز لا يسـبب بمفـرده اضطرابا كبيرا في الهواء، ولكـن عندمـا تكـون اهـتزازات الوتـر سـببا في جعـل لـوح الخشب في آلة الكمان مصوتا / مرنانا كما هو الحال في البيانو والكمـان، فـإن صوتـا أعلى بكثير ينتج. على أي حال يجب علينا ملاحظة أن اللَوح المصوَت وجسم الكمان لا يهتزان بنفس الطريقة

التي تهتز فيها الأوتار المسببة لتلك الاهـتزازات. ولحـد معين فـإن كـلا منـهما يفضل طريقته الطبيعية في الاهتزاز.

نحن كلنا على ألفة مع أشـياء متعـددة عـن الآلات الموسـيقية الـتي لديـها ميـل للاهتزاز وفقا لترددات مخصوصة. فالزجاجـات و المزهريـات و أشـياء أخـرى كثـيرة سوف تصدر نغمة رنانة عندما تطرق. وهذه الأشياء سوف تدوي، عندما تُعزف نغمة ملائمة على البيانو. وحتى الزجاجات يمكن أن نجعلها ترن إذا ما غنـى شـخص لحنـا مناسبا. وفي كثير من الأحيان يقال بأن مغنيَ الأوبرا عندمـا يصدحـون نغمـة ملائمـة بصوت مرتفع جدا وواضح، يؤثرون على الزجاج فيتذبذب لدرجة أنه يتشظى تجاوباً مع اللحن، وعلي الاعتراف هنا أنني لم يسبق لي أبدا مشاهدة هذا الحدث.

مثال أكثر بساطة على ظاهرة من هذا النوع يمكن أن يوضح عن طريق شوكتين رنانتين متوافقتين، إذا ما طرقت إحدى الشـوكتين ومـن ثـم أحضـرت بـالقرب منـها شوكة أخرى لها نفس التردد الطبيعي للذبذبة، فإن الشوكة الأخرى ستبدأ بـالاهتزاز، و بمجرد أن تبدأ الشوكة الثانية بالحركة، سوف تحدث بالطبع موجة صوتيـة بالطريقـة الاعتيادية. وحتى لو أنك أوقفت الشوكة الأولى بوضع إصبعك عليـها، فـإن الشـوكة الثانية والتي بدأت بالاهتزاز سوف تسـتمر بـالاهتزاز حتـى تعـود لوضعـها الطبيعـي (الاستقرار)، بمحض اختيارها.

وهذه الظاهرة التي يمكن من خلالها أن يتحرك جسم بفعل اهـتزاز جسـم آخـر تعرف بالرنين فيقال أن جسما يتجاوب مع جسم آخر.

طرق الشوكة الأولى، فإنها تهتز، مسببة تنوعات في ضغط الهواء تنتشر خارجـا، هذه التنوعات في الضغط كما رأينـا، هـي نتيجـة حركـات صغـيرة لجزيئـات الهـواء، وعندما تحدث تنوعات في ضغط الهواء بمجاورة الشوكة الثانيـة، فـإن جزيئـات الهـواء

هناك تهتز بنفس طريقة الشوكة الأصلية، هذه الحركات تعمل كسلسلة من الدفعات على الشوكة الثانية، والتي تبعا لذلك تبدأ بالحركة.

ومن المهم ملاحظة أن الشوكة الثانية لا تبدأ بإصدار الصوت عاليا بمجرد طرق الشوكة الأولى، إن الاهتزازات تستغرق زمنا محددا لتصل إلى الحد الأقصى.

إن جزيئات الهواء تتحرك بحيث أن كل حركة ذهابا وإيابا تعمل كضربة صغيرة يضاف تأثيرها للضربة السابقة، ولأن كلتا الشوكتين لهما تردد طبيعي واحد، فإن كل واحدة من هذه الضربات الصغيرة تصل في اللحظة المناسبة، وبذا فإن تأثيرها يزيد كمية الاهتزازات. وربما أمكننا جعل ذلك أكثر وضوحا عندما ندرس حالة موازية تبدو أكثر ألفة.

أفرض أنك أردت أن تأرجح طفلا على أرجوحة، فإنك تبدأ بإعطائه دفعة صغيرة جدا بحيث تبدأ الأرجوحة بالابتعاد عنك، ثم عند عودتها نحوك ثانية وفي لحظة وصولها إلى قمة منحنى حركتها، فإنك تعطيها دفعة أخرى صغيرة. إن هذا من شأنه أن يزيد سعة تأرجحها.

وفي الوضع التالي فإن دفعة أخرى صغيرة سوف تجعل الطفل يتأرجح لارتفاع أعلى، وبعدد من الدفعات الصغيرة فإنه يمكنك بناء حركة كبيرة للأرجوحة، ولكن ذلك كله يعتمد على التوقيت للدفعات الصغيرة أو الضربات الصغيرة.

إنك إذا حاولت دفع الأرجوحة دفعة صغيرة إضافية في وقت ما زالت الأرجوحة قادمة نحوك فإنك ستقوم بإبطائها لا على مساعدتها، ولن يكون لدفعك الأثر الأكبر إلا إذا انتظرت حتى تبدأ الأرجوحة بالابتعاد عنك، إن هذا هو عين الوضع بالنسبة للشوكتين المتوافقتين: إن الضربة الصغيرة الأولى سوف تمنح حركة صغيرة للشوكة الثانية، ولكن هذه الشوكة التي أزيحت من وضع السكون الخاص بها تتحرك راجعة ثانية بالمعدل الطبيعي للتذبذب الخاص بها، وتبدأ بأرجحة ثانية عندما تحدث الضربة الثانية، هذه الضربة وكل الضربات التالية من شأنها المساهمة في بناء ذبذبات كبيرة، لكنه من الواضح أن الشوكة الرنانة الثانية سوف تتذبذب فقط إذا وصلت الضربات في اللحظة الملائمة، وهذا سوف يحصل إذا ما كان المعدل الطبيعي للتذبذب (التردد) للشوكتين الرنانتين واحدا.

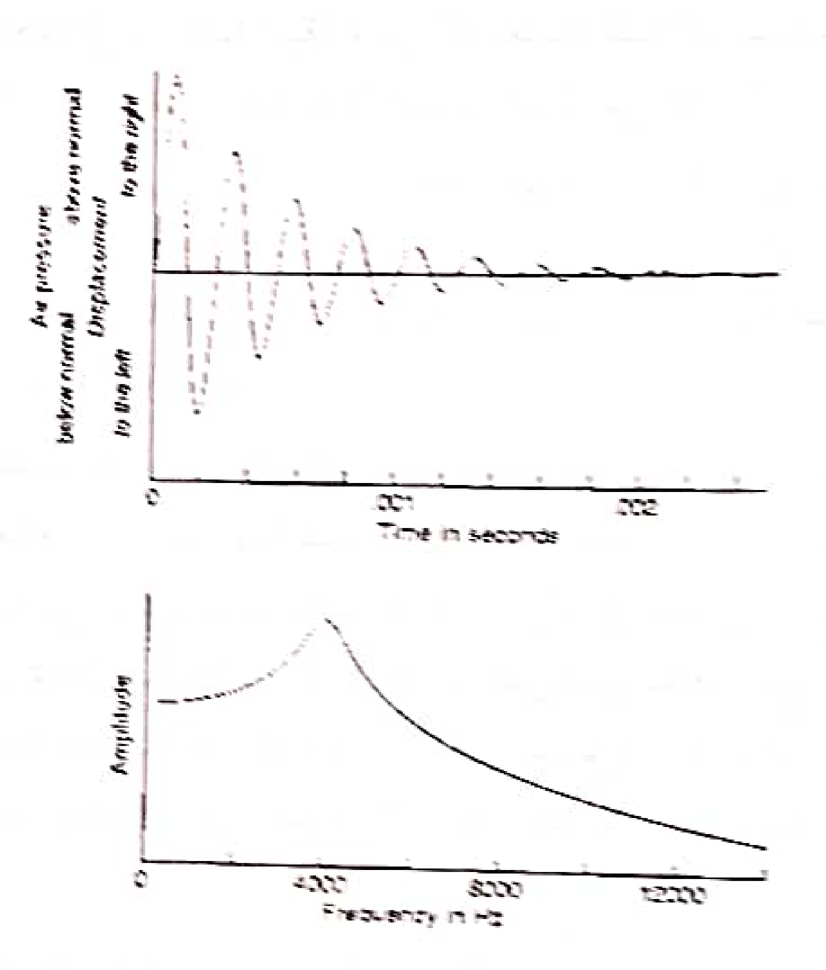
يمكننا الآن دراسة حالات أكثر تعقيدا للرنين مثل شروع الزجاجة أو الكأس بالرنين، عندما تعزف النغمة الملائمة على البيانو. (وأساسا فإن المبدأ نفسه يسري مفعوله هنا).فالبيانو يسبب حركة في جزيئات الهواء التي تجعل الكأس يهتز. كما رأينا في الفصل السابق، إن الموجة الصوتية الناتجة عن البيانو هي موجة مركبة.

الطيف في الشكل (4-4) يرينا أنها تتألف من التردد الأساسي (Fundamental) وعدد كبير من التوافقيات (Harmonics)، وبعضها قوي نوعا ما. إذا ما كان تردد أحد هذه المكونات مساويا للمعدل الطبيعي للاهتزاز للزجاج، بإمكانها إحداث حركات في الهواء تؤدي إلى اهتزاز الكأس.

في البداية، قد يبدو من الصعب الفهم بأن موجات الصوت التي تحدث بواسطة البيانو هي في الحقيقة مساوية لعدد من الموجات البسيطة من الناحية العملية،ولكن هذا في الواقع هو القضية، إن مثالا عدديا يجعل الأمر أكثر جلاء، لنفرض أن لدينا زجاجة تردد اهتزازها الطبيعي 1.046 هيرتز. عندما يُعزف لحن بهذا التردد (C" على البيانو فإن الكأس سوف يبدأ بالاهتزاز إلا أن الكأس سوف يهتز أيضا فيما لو كانت النغمة C (523 هيرتز) إن نغمة البيانو بهذا التردد تحتوي على توافق ثان قوي جدا قيمته (2 X 523) هيرتز. و نتيجة لذلك فإنه سيكون هناك حركات موقوتة لجزيئات الهواء تؤدي إلى اهتزاز الزجاج. إن حركة جزيئات الهواء المطابقة للتردد الأساسي (523 هيرتز) سوف تعمل بالتناوب على تدعيم ومعارضة هذه الحركات، وستعزز من الأولى عدد ما تقفل من الثانية، ولن يكون للتوافقات الأعلى أي تأثير معاكس يُذكر، ونتيجة ذلك، فإن الزجاج سوف يتذبذب وفق مقتضى تردده الخاص والذي هو وفق التوافقة الثانية.

في فصول سابقة،رأينا أن الصوت يتكون أساسا من الاختلافات في ضغط الهواء نتيجة لحركات صغيرة في جزيئات الهواء والتي بدورها تحدث نتيجة حركة مصدر الصوت،وبناء عليه فإن رسماً بيانياً لموجات الهواء كما في الشكل 5-1 يمكن اعتباره ممثلا كلا من الاختلافات في ضغط الهواء أو الحركات في مصدر الصوت. وبالمثل فإن الطيف المطابق يعطي مؤشرا، عن المكونات التي قد نستخدمها لا بتناء الموجة المركبة، وهي أيضا تمثل وصفا لترددات الاهتزاز الطبيعية لمصدر الصوت.

هذه هي بالطبع الترددات التي وفقا لمقتضاها سوف يستجيب مصـدر الصـوت عندما يتصرف كمصدر رنين. وهكذا نرى أن الشكل 5-1 يمكن النظر إليه من زاويتين: فهو لا يبين تركيبة الموجة المركبة التي أنتجها مصدر الصوت فحسب بل يظهر الترددات التي يستجيب عندها مصدر الصوت بسهولة و يُسر.



شكل 5-1 الجزء العلوي من الشكل : رسم بياني لموجة صوت (ولحركات مصدر الصوت المنتج لموجة الصوت). الجزء الأسفل من الشكل : طيف موجة الصوت وحركات مصدر الصوت.

في هذه الحالة فإن مصدر الصوت يحقق أفضل تجاوب لترددات حول 1000 هيرتز (وهو تردد المكون الأساسي في الموجة المركبة). ومن الممكن أن يتأثر بشكل بسيط بترددات حول 900 هيرتز و 1100 هيرتز. (المناطق التي يكون فيها مكونات صغيرة في الموجة المركبة). إلا أنه من الصعب أن يستجيب لترددات تزيد عن 3000 هيرتز (المناطق التي لا يكاد يوجد فيها أي طاقة في الموجة المركبة). هذا المبدأ ينطبق على

جميع مصادر الصوت. إن طيوف الأصوات المنبعثة من تأثير اهتزازات حرَّة هي أيضا دلالة على الترددات التي سوف تستجيب لها مصادر الصوت.

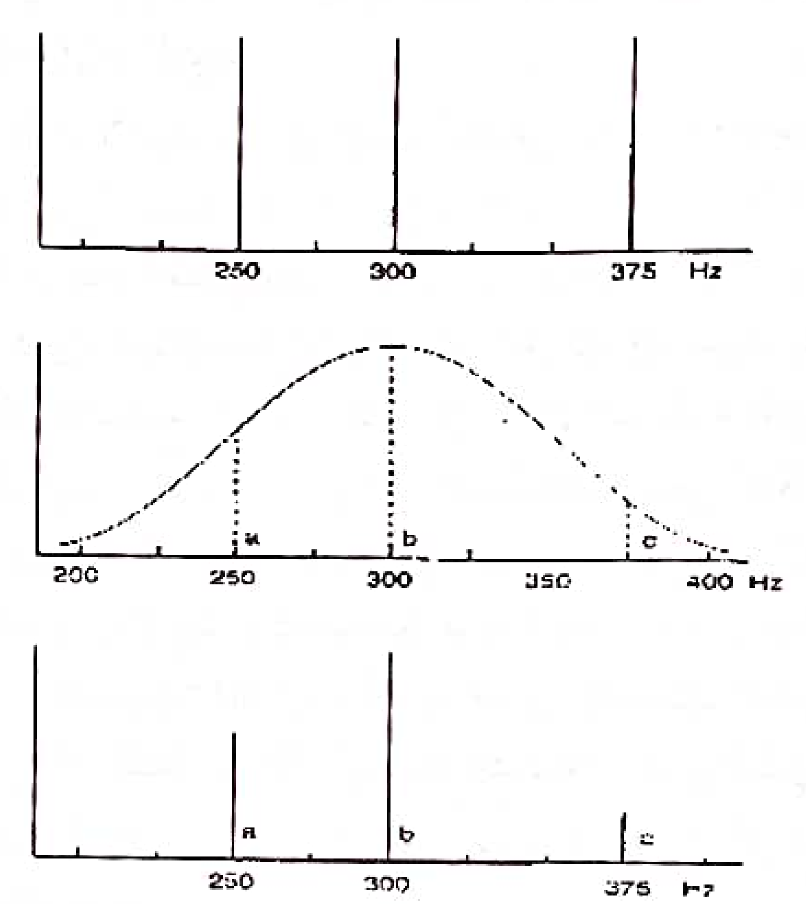
وكمثال إضافي لهذه الظاهرة لندرس الشوكة الرنانة التي طيفها منحنى ذو قمة شديدة الانحناء. كما رأينا في الفصل الآنف، إن هذا المنحنى يدل على أن كل الطاقة مركزة في منطقة تردد واحدة ضيقة بمعنى أنها نغمة نقية تقريبا، ونتيجة ذلك فإن شوكة رنانة لن تتجاوب إلاّ مع موجة صوتية محتوية على هذا التردد، كما سبق ورأينا إن من أهم المزايا التي يتصف بها هذا المنحنى ذي القمة الحادة هي دلالته على مصدر صوت لا يتلاشى إلا بعد وقت طويل،ونفس الشيء - عندما تعمل الشوكة الرنانة مع شوكة أخرى متجاوبة كما سبق لنا مناقشة ذلك - فإن الشوكة المستجيبة تحتاج إلى وقت طويل لتجميع وبناء اهتزازاتها.

إذا جعلنا اهتزازات الشوكة الرنانة تتلاشى بشكل أسرع ربما عن طريق لمسة خفيفة بقطعة من الصوف، فإننا نبدل نوعيه الموجة الصوتية الناتجة، إضافة لذلك، فإننا نبدل الطريقة التي تستجيب بها باعتبارها مرنانا. رأينا في الفصل الرابع أن الأصوات التي تتلاشى بمعدل سرعة أكبر تتشتت طاقتها على مدى نطاق واسع من الترددات. إن شوكة رنانة جُعلت اهتزازتها قابلة للتلاشي السريع ستنتج موجة مركبة لها عدد من الترددات، ونفس الشيء، سوف تتجاوب عندما تكون مجاورة لأيَ من هذه الترددات.

إن مصدرا للصوت موجات صوته تتلاشى بسرعة يقال عنه " متضائل". إن شكل موجة لا تكراري يتلاشى بسرعة يدعى صوتا سريع التضاؤل. وإن لوح الصوت للبيانو وجسم الكمان أمثلة على المستجيب المتضائل، والشوكات الرنانة لأغراض عملية مصادر صوت غير متضائلة (رغم أنه نظريا، مقاومة الهواء الخفيفة وغيرها من قوى الاحتكاك التي تبطئ رنينها تدريجيا تصنف على أنها قوى اضمحلال).

يمكننا إعادة صياغة نتائجنا عن الرنين بطريقة مختلفة. المتجاوبات resonators المتضائلة التي تنشأ ذبذبتها وتتلاشى سريعا تتحرك بفعل نطاق واسع من الترددات

بمعنى أنها ترسم بيانيا عن طريق منحنيات منبسطة وبالمقابل، فإن اهتزازات المتجاوبات غير المتضائلة تحتاج إلى وقت أطول حتى تنشأ وتتلاشي وهذه المتجاوبات لا تتحرك إلا بفعل نطاق محدود من الترددات أي أن وصفها يتم بواسطة منحنيات حادة القمم.



شكل 5-2 الشكل يوضح ثلاث نغمات نقية بترددات وسعات على نحو ما هو مبين حينما يتم وضعها في نظام له منحنى رنين، كما هو في الجزء الأوسط من الشكل، فيهتز النظام عندئذ بترددات وسعات كما هو ظاهر في الجزء الأسفل من الشكل.

إن المنحنى الذي يصف الطريقة التي تتذبذب بها المتجاوبات تأثرا بأي تردد معين يدعى "منحنى الرنين"، وعليه فإنه يمكننا رؤية نوع المعلومات التي تنقلها إلينا هذه المنحنيات، وقد ندرس حالة المتجاوب المتضائل كما هو واضح في الشكل 5-2.

(إن هذا المنحنى هو أيضا وصف للموجة المركبة التي قد يتم توليدها عن طريق المتجاوب). والآن دعنا نفترض أننا نحاول جعله يستجيب لثلاثة نغمات نقية.

دعنا نقترح أن ترددات هذه النغمات الثلاث هي: 250 هـيرتز، 300 هـيرتز، 375 هيرتز، مع ملاحظة أنها جميعا لها نفس السعة، (بمعنى أن لكل منها قمم ضغـط متساوية الارتفاع). إن المتجاوب سوف يهتز استجابة لكل واحدة من هـذه النغمات لكنه يفضل الاهتزاز تأثرا بتردد 300هيرتز، نتيجة لذلك فإن نغمـة بـتردد 300 هـيرتز سوف تحدث الاهتزازات الكبرى.

إن حجم تلك الاهتزازات التي يحدثها المتجاوب تأثرا بهذه النغمة يمكن تمثيلـها بالخط b. وبالرغم من أن نغمة بتردد 250 هيرتز لها نفس سعة نغمة 300 هيرتز فإنـها لن تسبب اهتزازات بهذا الحجم باعتبار إنها ليست التردد المفضل الذي يستجيب لـه المرنان. وعندما يتحرك المرنان بفعل تأثير نغمة 250 هيرتز، فإنه سوف يهتز بسعة يعبر عنها بالخط a. أي تناسبا مع نغمة 250 هيرتز في موجتها المركبة. وبالمثل، نستنتج مـن المنحنى حجم الذبذبات التي يحدثها المتجاوب عندما يتحرك بفعل نغمة 375 هـيرتز. إنه من الصعب على المتجاوب أن يكون له أي ميل طبيعي للاهتزاز بتأثير هذا التردد، إن توافق 375 هيرتز في الموجة المركبة له سعة صغيرة جدا. ونتيجـة ذلـك فـإن نغمـة 375هيرتز سوف لا تسبب إلا اهتزازات تجاوبيه صغيرة. إن سعتها ممثلة بالخط القصير C، إن حجم اهتزازات المتجاوب على أي تردد يعتمد على المدى الـذي يكـون هـذا التردد فيه متواجداً في الموجة المركبة. وهذا ما نعنى بقولنـا أن شـكل منحنـى الرنـين لجسم ما يشبه شكل طيفه.

إن المتجاوب الذي يظهر في الشكل 5-2 يمكن جعله في حالة اهتزاز تحت تأثير نغمات ذات ترددات / مكونة من 250 هيرتز إلى حـوالي 350 هـيرتز،ومقارنـة مـع ذلك، فإن منحنى الرنين البادي في الشكل 5-1 يمثل متجاوبا يسـتجيب بشـكل فعـال مع مدى أوسع بكثير من الـترددات- يـتراوح مداهـا بـين 3000 - 5000 هرتـز. وفي بعض الحالات يلزم تحديد المدى الذي يؤدي إلى اهتزاز المتجـاوب. إنـك تسـتطيع إن شئت، أن تعتبر هذا نوعا من قياس حساسية المتجاوب. إن الشـوكة الرنانـة حساسـة لمدى ضيق جدا من الترددات، في حـين أن المتجـاوب المتضـائل يمكـن دفعـه للحركـة بتأثير نطاق أوسع من الـترددات. ولكـن مـن الصعـب تقديـم وصـف دقيـق لحزمـة

الترددات التي يمكن استخدامها لدفع المتجاوب إلى حالة الاهـتزاز، ويعـود السـبب في ذلك الى الطريقة التي تتناقص فيها منحنيات الرنين تدريجيا.

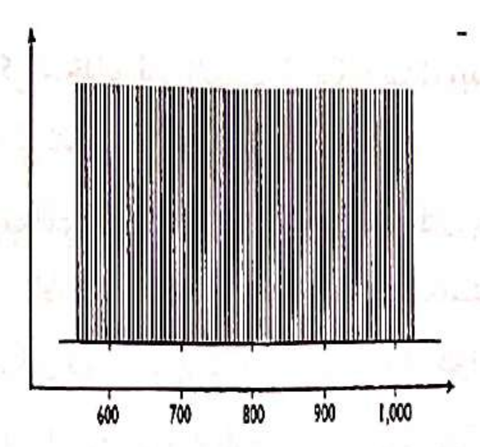
إن المتجاوب الذي ناقشناه في الفقرة الماضية، على سبيل المثال، يمكن أن ندفعـه إلى حالة اهتزاز بوساطة الترددات ذات 375 هيرتز، لكن اهتزازته اسـتجابة لـترددات في هذا النطاق ستكون صغيرة جدا ويمكن إهمالها لأسباب عملية كثيرة.

إن الأصوات التي استخدمناها لمحاولة دفـع المتجـاوب إلى حالـة اهـتزاز تعـرف بمدخل التجاوب. إن الطريقة التي يهتز بها المتجاوب استجابة لهذه الأصـوات تعـرف بأنها ُمخرجه في مقابل ُمدخل معين.

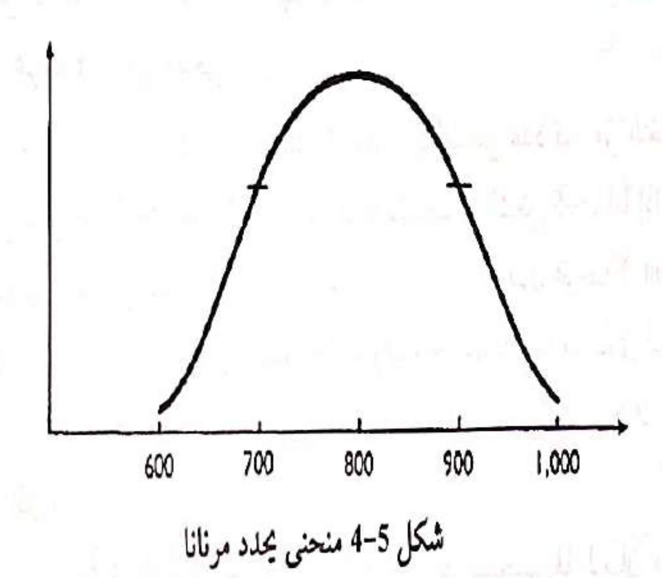
والآن افرض أن مدخل (input) المتجاوب يتألف من عدد كبير من النغمات، ولكلٍ نفس السعة. مثل هذا المدخل يمكن تمثيله بالطيف في الشكل 5-3، أما إذا كـان المتجاوب ذا منحنى بقمة 800 هـيرتز كمـا في الشـكل 5-4 فـإن مخرجـه (output) سيكون صوتا ذا طيف ممثل في الرسم 5-5، سوف يتجاوب بفاعلية قصـوى لنغمـة 800 هيرتز (والتي تعرف بنغمة الرنين)، وبفعالية متناقصة لنغمات على كـلا جـانبي ذلك التردد.

ومن الطرق المتبعة في وصف نطاق الترددات التي تستجيب لها المرنـان بفاعليـة عندما نتناول بالدرس الترددات التي تكون سعة مخرجها تساوي 70،70٪ من المخـرج عند التردد الرنيني.

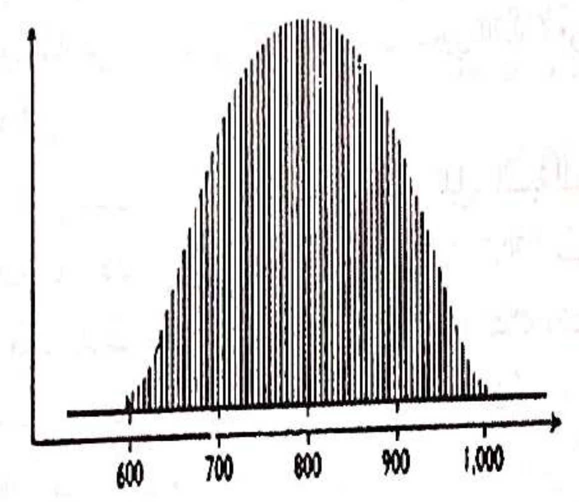
وسنوضح السبب في اختيار هذه القيمة بالذات بعد قليل، بالنسبة للمرنان قيـد الدرس، المخرجات عند 700 هيرتز و900 هيرتز سوف تكون 70،70٪ مـن المخـرج عند 800 هيرتز، بالرغم من كون المدخلات عند هذه الترددات الثلاثة كانت واحـدة. وبناء عليه يمكننا أن نعتبر هذا الجسم المرنان فعالا في هذا المدى. إن أي تردد بين 700 هيرتز و 900 هيرتز سوف يحدث اهتزازات تكون سـعاتها علـى الأقـل 0،707 مـن سعات اهتزازات سببها نغمة ترددها 800 هيرتز.



شكل 5-3 طيف صوت يتألف من عدد كبير من النغمات بنفس السعة.



شكل 5-4 منحنى يحدد مرنانا



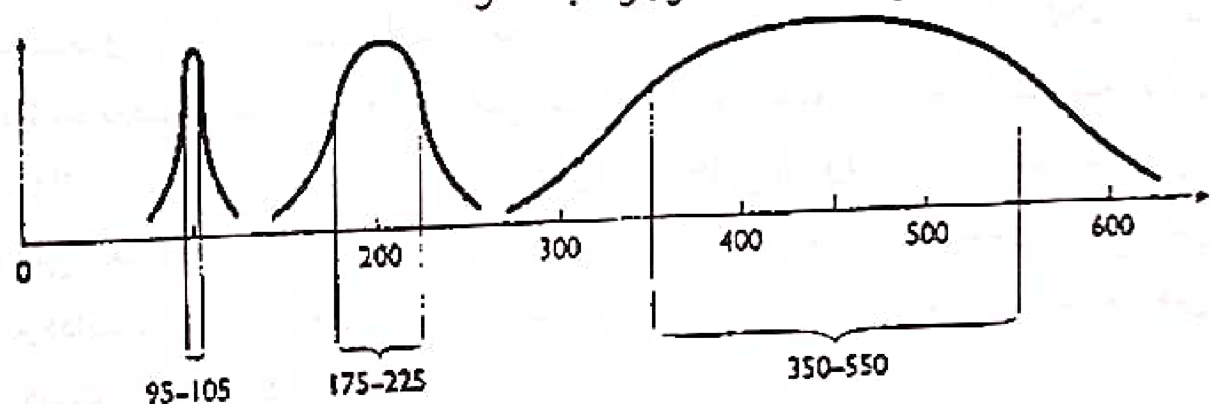
شكل5-5 مخرج المرنان في شكل 5-4 حين يطبق المدخل المبين في الشكل 5-3 عليه

إن مدى التردد الفعال لمرنان يعرف بنطاق الترددات (band width)، ويبين الشكل 5-6 رسوماً بيانية لأجسام مرنانة نطاق تردداتها 10 هيرتز(من95-105 هيرتز)، و 50 هيرتز (من 175-225 هيرتز)، و200 هيرتز (من350-550) هيرتز، و كما ترى فأن قمم منحنى الرنين هي 100 هيرتز، و200هيرتز، و 450هيرتز، إن الترددات التي تصل إلى 5 هيرتز و 25 هيرتز، و100 هيرتز على كلا جانبي هذه القمم ستحدث منتجات قيمتها 70، 7% من سعة المخرج عند التردد الرنيني (resonant frequency).

عندما نحلل الأصوات فإننا نستخدم الأجسام المرنانة (أو الحواسيب التي تحاكي هذه الأجسام المرنانة) لتخبرنا أيا من الترددات موجودة، إن هناك صعوبة في تصميم أجسام مرنانة لهذا الغرض، كما سبق وأكدنا، إن أجساما مرنانة بنطاق ترددات ضيق (بمعنى، منحنيات رنين بقمم حادة) تستجيب لمدى صغير من الترددات، لكنها ستستغرق وقتا أطول نسبيا لتبني سعات اهتزازتها، وهي أيضا ذات معدل تلاشي أبطأ أنها قد تعطينا معلومات دقيقة عن الترددات الموجودة في الموجة الصوتية الا أن اهتزازاتها تستغرق وقتاً طويلاً نسبياً لتتكون كما تحتاج إلى وقت طويل كي تتلاشى، وعلى العكس من ذلك تماما، فإن الأجسام المرنانة التي تستجيب لمدى أوسع من الترددات تبني الحد الأقصى من سعاتها أسرع بكثير، إنها قد لا تنبؤنا بالضبط عن ترددات الموجة المركبة، لكنها تحتاج إلى وقت أقل لتقديم المعلومات.

ولهذا السبب نجابه مشكلة في تصميم مرنان يتجاوب مع تردد معين، دعنا نفترض، على سبيل المثال بأننا أردنا معرفة ما إذا كان هناك مكون بتردد 500 هيرتز لاحد أصوات الكلام، إن مرنانا حساسا لنطاق ضيق من الترددات حول 500 هيرتز سوف يتطلب مقدارا معينا من الزمن ليستجيب، لكن صوت الكلام قيد الدرس قد لا يستمر طويلا، وبناء عليه،فإنه كان يجب علينا استخدام مرنان يستجيب بشكل أسرع وهذا يعني بالطبع أنه يستجيب أيضا لمدى أوسع من الترددات، إننا نستطيع أن نعرف بالضبط الترددات الموجودة في الصوت، في حالة واحدة وتلك فقط حين يكون لدينا الوقت الكافي لمرنان ذي نطاق ضيق لجعله في حالة اهتزاز.

إن نفس المبدأ ينطبق بصرف النظر، فيما إذا كنا نستخدم أجساما مرنانة حقيقية أو حواسيب لتحليل الصوت، إن الحاسوب يقتطع قدراً معينا من طول الصوت. وكلما ازداد التحليل لطول الصوت طولاً، كانت معرفتنا للترددات المكونة اكثر دقة، وكما سوف نناقش في فصل لاحق، قد نتناول جزءاً من صوت مدته 50 مل ثانية ونعرف من خلال التحليل الصوتي الترددات المكونة لأقرب 40 هيرتز، أو أن ندرس بدلاً من ذلك مدة أطول للصوت ذاته تقدر بالمائة ملثانية (millisecond 100)، وسنكون بذلك قادرين على تحديد الترددات المكونة لأقرب 20 هيرتز. إننا بالطبع سنجد معدل التردد لمكونات خلال كل فترة المائة ملثانية، وهي تقريبا مدة نقيس بها من نصف المقطع من الكلمة. إذا أردنا معرفة كيف اختلفت الترددات في الربع الأول من مقطع، علينا أن نقتنع بتحليل يحدد الترددات المتوقعة لأقرب 40 هيرتز. إنها حقيقة من حقائق الحياة أن أحدا منا يمكنه معرفة متى حدث الصوت بالتحديد، أو يمكنه معرفة الترددات الموجودة بدقة نوعاً ما.

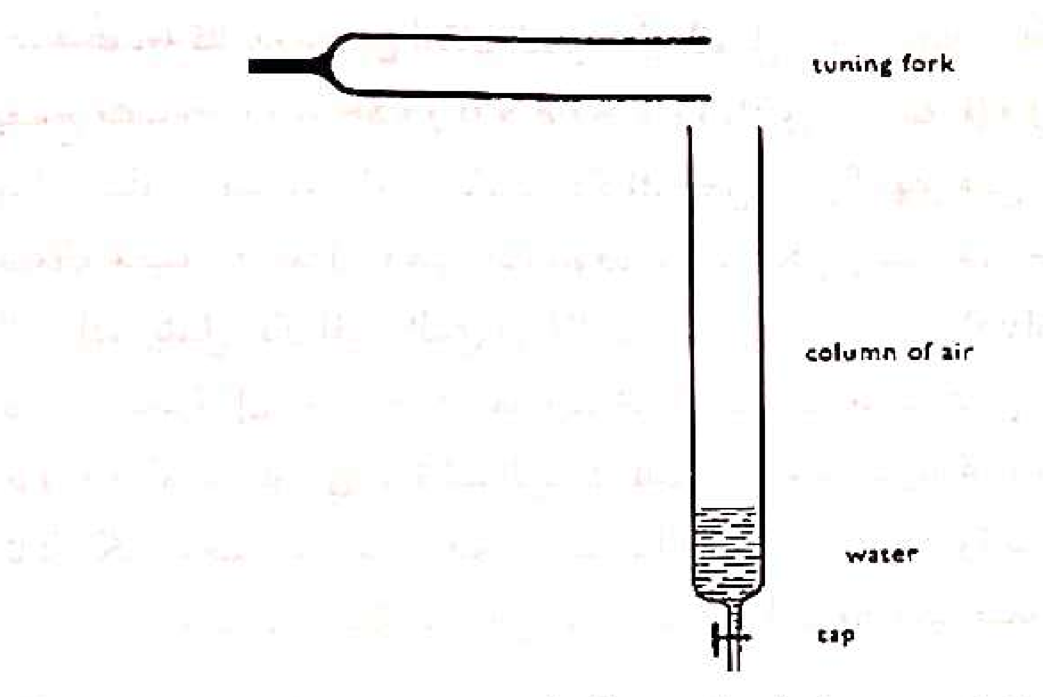


شكل 5-6 منحنيات تحدد ثلاث مرنانات مختلفة، لكل منها تردد مركزي مختلف وعرض نطاق ترددي مختلف

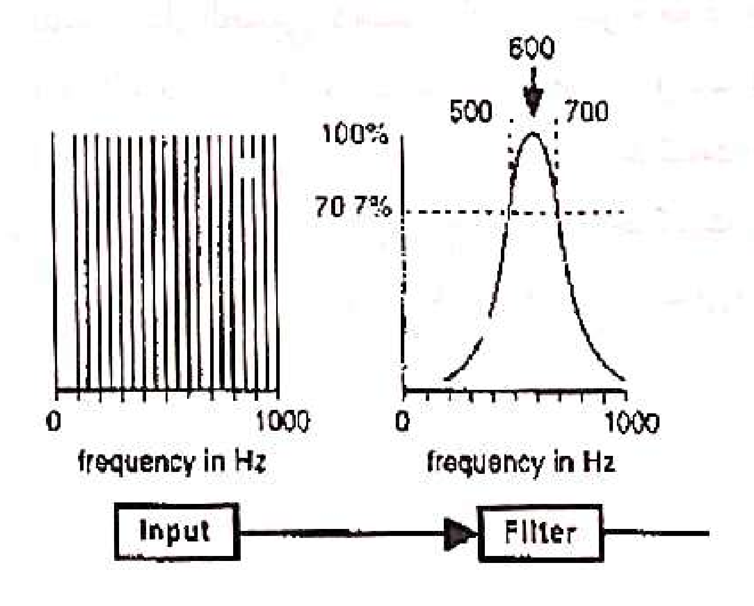
معظم الأجسام المرنانة التي كنا مهتمين بها كانت أجساما مهتزة مثل الشوكات الرنانة، وأوتار البيانو، إلاّ أنه من الممكن لكمية من الهواء أن تهتز، وعليه يصبح الهواء قابلاً لأن يكون مصدراً من مصادر الصوت أو مرنان، هذا ما يحدث عندما تصوت زجاجة عن طريق النفخ في فوهتها. فالصوت البشري والأرغن و آلات كثيرة أخرى تستفيد من عمود الهواء المهتز.

عندما كنا ندرس عن انتقال الصوت في الفصل الأول، رأينا أن الهواء يمكن أن يصبح متضاغطاً ومتخلخلا، وإذا ما تم احتواؤه بالشكل المناسب، فإنه في واقع الأمر يسلك سلوكا ُمشابهاً لزنبرك ملفوف، يمكنك جعل الزنبرك يهتز عن طريق ضغطه ضغطة خفيفة، إن معدل الاهتزازات سوف يعتمد بشكل رئيسي على حجم وقوة شد الزنبرك، وبالمثل، فأن الهواء الذي في الانبوب يمكن أن يبدأ بالاهتزاز إذا تم تحفيزه بصورة مناسبة. إن معدل اهتزاز الهواء بداخل الانبوب يعتمد على حجمه وعلى مرونته (العامل الموازي لقوة شد الزنبرك الملفوف). تعتبر المرونة عادة عاملاً فيزيائياً ثابتاً، لكن حجم مقدار من الهواء يمكن بالطبع، أن يستبدل. وكما هو الحال في الزنبرك الملفوف تهتز كمية كبيرة من الهواء على نحو أبطأ من كمية صغيرة من الهواء المحتوى بنفس الطريقة.

يبين الشكل 5-7 ترتيباً مخبريا نموذجيا لتوليد عمود مهتز من الهواء، يمكن تعديل الطول الفعال للأنبوب بزيادة أو إنقاص كمية الماء المحتواة في الأنبوب. عندما يصل الطول حداً يصبح عنده المعدل الطبيعي لاهتزاز كمية الهواء معادلة للمعدل الطبيعي لاهتزاز شوكة رنانة مثبتة فوقه فإن رنينا سوف يحصل. وكما في الأمثلة الأخرى للرنين. فإن حركات بسيطة للشوكة الرنانة ستعمل حركات صغيرة في الشوكة الرنانة كسلسلة من الضربات تؤدي في النهاية إلى إنشاء حركات كبيرة من الهواء. وهذه الحركة سوف تسبب اضطراباً في الهواء المحيط، والذي بدوره، سينتشر بعيداً على شكل موجات صوتية.



شكل 5-7 ترتيب نموذج لما يجري في المختبر . إنتاج عمود هواء مهتز



شكل 5-8 مدخل ومخرج مرشح بتردد مركزي قيمته 600 هرتز ونطاق ترددي قيمته 200 هرتز

إنَ الهواء في وعاء عادة ما يهتز بشكل معقد، ومن بين العوامل التي تؤثـر علـى شكل الموجة المركبة شكل الوعاء، مثلا، زجاجة بعنـق رفيـع وجسـم كبـير لهـا تـردد اساسي أقل من زجاجة ذات عنق عريض (واسع) ولها نوعا ما حجم أصغر. أعمدة الهواء الرنانة ذات أهمية كبيرة من وجهـة نظرنـا، لأن الاختلافـات بـين الكثـير مـن أصوات الكلام ترجع إلى اختلاف شكل حجم الهواء الموجود في الفم والحلق. سـوف نتناول بالشرح اهتزازات الهواء في القناة الصوتية في الفصلين السابع والثامن.

إذا ما جعلنا مجموعة كاملة من الشوكات الرنانة تصـدر أصواتـها فـوق أنبـوب فارغ، فإن بعضها سوف يكون عديم التأثير فيما أن أخريات سوف تجعل الهواء داخل الأنبوب يهتز. والآن دعنا نفترض أن هذا الأنبوب نافذ خلال حائط. وعندما تصوّت بعض الشوكات الرنانة داخـل الأنبـوب فـإن المسـتمعين في الغرفـة الأخـرى قـد لا يسمعون شيئا، فيما قد يسمعون غيرها من الشوكات الرنانة بشكل منخفض وغيرهـا قد تسمع بشكل قوي. إن سماعنا صوت شوكة بشكل واضح يعتمد على الهواء الذي يحتويه الأنبوب الذي اهتز بفعل الشوكة الرنانة.

وعندما يتصرف المرنان بهذه الطريقة فإننا نسـميه "مرشـح صوتـي" (acoustic filter)، إن المرشح هو جسم مرنان يستخدم لتمرير الصوت أو نقله وهو انتقائي مـن ناحية التردد، وبعبارة أخرى إنه ينقل ترددا واحدا بفعالية أكثر من الترددات الأخرى. إن مدى الترددات التي سوف يمررها المرشح يعرف "سعة النطاق للموجات المرشـحة". إذا ما كان المدخل للمرشح يتكون من عدد كبير من الترددات المختلفة وكلـها بنفـس السعة، فإن سعة نطاقها سوف تسمى بمدى الترددات التي سوف تمر على الأقل بمعدل (70.7٪) من سعة التردد الذي تسـمح بتمريـرة بفعاليـة قصـوى، (وسنشـرح سـبب اختيارنا للقيمة (70.7٪) في الفصل القادم).

وبشكل تخطيطي يمكننا أن نعتبر المرشح جهازا كما يبدو وسط الشكل 5-8. إن هذا نظام قد نضع فيه مدى من الترددات كما هو ممثل بـالصورة الطيفيـة علـى يسـار الشكل، مجموعة من النغمات من نفس السـعة وبـترددات 50 هرتـز 100 هرتـز و 1000 هرتز. عندها سوف يقوم المرشح بتمرير الترددات الموجودة في منحناه الرنيـني،

وبذا يكون منتجة كما يبدو في الطيف على يمين الشكل. في هذه الحالة فـإن للمرشـح ترددا مركزيا مقداره 600 هيرتز وسعة نطاق موجة بتردد 200 هيرتز، بعبـارة أخـرى سوف ينتج ترددات بين 500 هيرتز و 700 هيرتز، وبهذا فإن لها علـى الأقـل 70.7٪ من سعة النغمة بالتردد 600 هيرتز ونفس السعة المدخلة. يمكن أن يقال عن تـرددات الرنين لمرشح أنها تشكل القطب، وبهذا فإن المرشح البسيط الذي تحدثنا عنه يمكن أي يقال عنه ذا قطب بتردد 600 هيرتز وسعة نطاق 200 هيرتز.

الفصل السادس

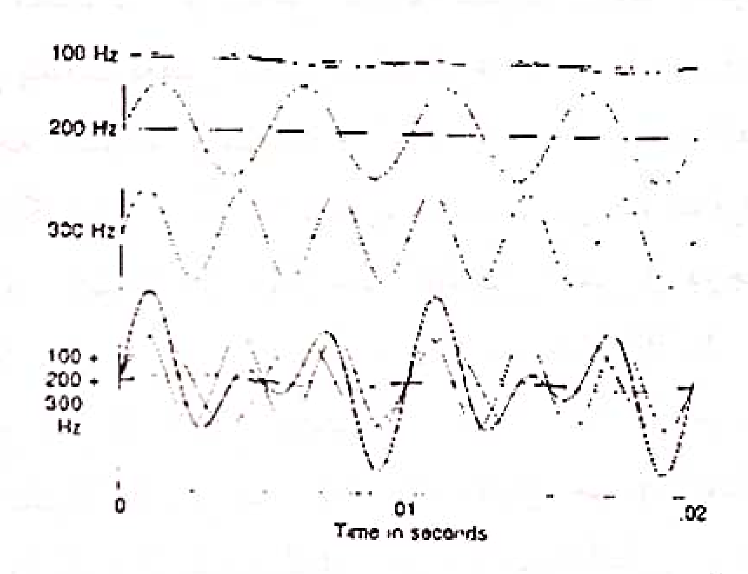
السمع

الفصل السادس

السمع

على جميع طلاَب النطق أن يكونوا على معرفة ببعـض حقـائق السـمَع. بدايـة، سنتناول موضــوع الإدراك الحسـي لدرجـة الصَـوت لأصـوات مختلفـة. في الفصـول السابقة افترضنا مقدَما بأن الإحساس بدرجة الصَوت يعتمد مباشرة على تردد الموجة. وهذا الافتراض يتطلب بعض التعديل، لأن تنوعا في السعة سـوف يؤثـر أيضـا علـى الإحساس بدرجة الصَوت. وتعتمد طبيعة هذا التأثير على تردد الصَوت قيد الدرس. كقاعدة تقريبية يمكننا القول بأنه : كلما ازدادت سعة أي صوت تردده الأساسي فـوق 1.500 هرتز، فإن الصَوت لن يكون عاليا فقط بـل أعلـى في درجـة الصَـوت أيضـا. وبالعكس، إذا زدنا في سعة أي صـوت تـردده أقـل مـن 1.500 هرتـز، فـإن درجـة الصَوت ستسمع بصورة أخفض. بإمكانك فحـص هـذا التأثـير بنفسـك عـن طريـق إحداث صوت لشوكة رنانة ترددها، لنقل، 200هرتز، حرَكها للخلـف وللأمـام قريبـا من أذنك. عندما تكون قريبة من أذنك ستصدر صوتا أعلى ودرجة ستكون أخفــض بخلاف مما هي عليه عندما تكون أبعد. يمكن أن تجري هذا الاختبار مـن خـلال تجربـة اخرى، بتبديل مفتاح التحكــم بـالصَوت في جـهاز الراديـو عنـد استماعك لإشـارة توليفية. إذا كان تردد الإشارة التوليفية أقل من 1.500هـيرتز، مـن ثـم، فـإنك عندمـا تدير مفتاح التحكم بالصوت عاليا، سوف تسمع درجة الصَوت بشكل أخفض. على اي حال، كما سترى إذا ما اختبرت هذه التجارب، فالتنوعات في السعة ليس لها تأثير كبير على درجة الصَوت ولهذا فإننا ولأسباب عملية محضة، نقول بأن درجة الصــوت تعتمد على تردد الموجة.

إن درجة الصَوت المحسوس بها لصوت معقـد، تعتمـد على الـتردد الأساسـي لتكرار الموجة المركبة وليس على تردد المكوَن ذي السعة الأكبر. على سبيل المثال، خذ موجة ذات مكونات ثلاث كما هو موضَح في الجزء الأعلى من الشكل 6-1 ، إحداها موجة بتردد 100 هيرتز وذات سعة صغيرة جـدا، والأخريـات موجـات بـتردد 200 هيرتز و300 هيرتز وسعاتها أكبر. الموجة المركبة لها تـردد أساسـي قيمتـه 100 هـيرتز وبالتالي، درجة الصوت لنمط الموجة هذه ستكون ذاتها لنغمة نقية بتردد 100هرتز ولها سعة معادلة لهـا. حقيقـة أنَ التوافقـين الأول والثـاني لهمـا سـعات أكـبر مـن الـتردد الأساسي ليست ذات بال بالنسبة لدرجة الصوت المحسوس بها.

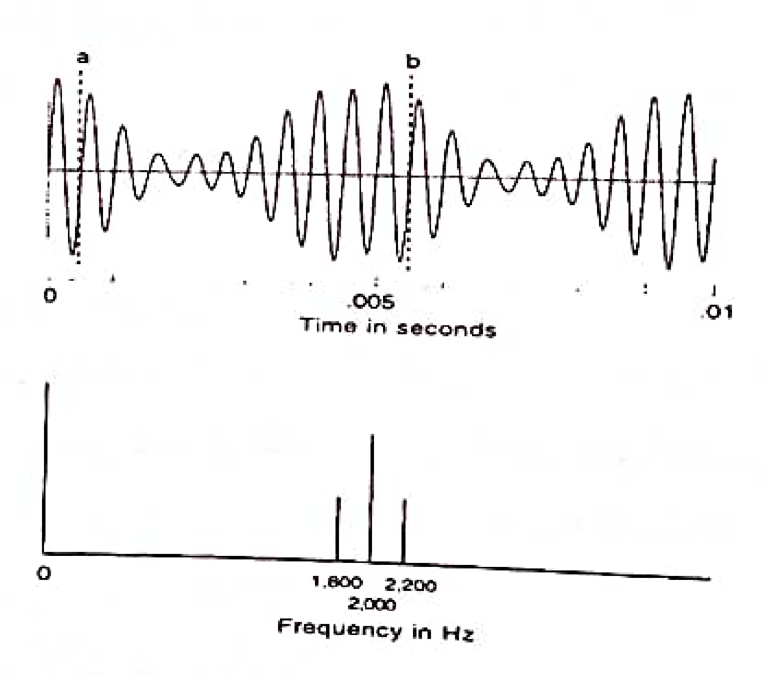


شكل 6-1 اتحاد موجة ذات تردد 100 هرتز سعتها صغيرة جدا مع موجات تردداتها 200 هرتز و300 هرتز بسعات أكبر

حتى أنه من الممكن عندما نقوم بتحليل تردد موجة مركبة، ربما نجـد بأنـه ليـس هنالك مكوَن بتردد يساوي تردد تكرار موجة مركبة. إذا استمر نمـط الموجـة المبيَـن في الشكل 6-2 إلى ما لا نهاية يمكن تحليله إلى مكونات بترددات قيمتـها :1.800 هـيرتز و2000 هيرتز و 2.200 هيرتز. ولكن نمط الموجة المركبة يكرر نفسه 200 مرة في الثانية (بمعنى من a إلى b 1/200 من الثانية). وبناء عليه، درجـة الصـوت المحسـوس بـها لهذا الصَوت ستكون ذاتها لنغمة نقية بتردد 200 هيرتز. على الرغم من أنـه يمكـن أن

يقال بأن الموجة المركبة.لا تحتوي إلا على مكون وهمي بهذا التردد (طريقة أخرى للنظر في تحليل تردد هذه الموجة المركبة القول بأن هناك مكوّنات بترددات :- 200و 400 و 600 و 800 ، ...، و جميع المضاعفات الكاملة الناتجة عن الضرب في عدد صحيح للتردد 200، ولكن ثلاثة فقط من هذه المكونات - تلك بترددات : 1.800 ، 2000، 2.200 هيرتز - لها أي سعة تذكر).

لأن الأذن تحدد درجة الصَوت بهذه الطريقة، باستطاعتنا في الغالب استبعاد المكونات ذات التردد المنخفض في موجة مركبة بدون التأثير على درجة الصوت المدركة، يمكننا على سبيل المثال، أن نمرر موجة مركبة بتردد أساسي هو 100 هرتز خلال مرشح يفصل جميع الترددات تحت الأقل من 500 هرتز. ما دامت بعض المكونات ذات التردد الأعلى تفصل واحدة عن الأخرى عند 100 هرتز، الموجة المركبة ما زالت تتكرر مائة مرة كل ثانية، ودرجة الصَوت التي نسمعها لن تتبدل. في الواقع، إنّ دائرة الهاتف العادية لا تمرر طاقة أقل من 300 هرتز. وهذا سيؤثر في نوعية الصَوت (بما أن النوعية تعتمد على الطريقة التي تتوزع من خلالها الطاقة ضمن مكونات التردد) لكن درجة الصَوت المدركة ستبقى ذاتها حتى لو كانت أقل من 300 هرتز.



شكل 6-2 الشكل الموجي والطيفي لموجة مركبة درجة صوتها مماثلة لنغمة نقية ترددها 200 هرتز

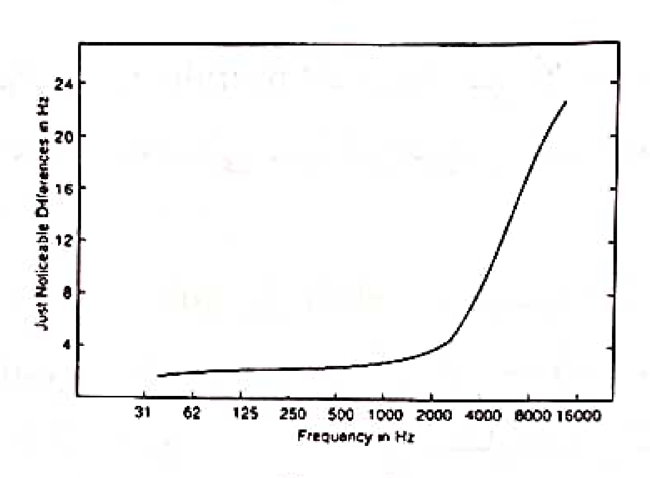
في هذا الكتاب نحن لسنا بصدد دراسة موضوع فسيولوجيا السمع، وظيفة الأذن هي تحويل الأمواج الصوتية، وهي شكل اكوستيكي للطاقة، إلى نبضات عصبية، (وهي شكل كيميائي كهربي للطاقة) يمكن معالجتها في الدماغ. الطريقة التي يحدث بها هذا الأمر تقع خارج مجال دراستنا، ولكن من الممتع أن نلاحظ أن بعض اختصاصي وظائف أعضاء الجسم أوضحوا بأن الأذن تنتج نمطا من النبضات التي تطابق بعض أنواع تحليل تردد الموجة المركبة، وسلسلة إضافية من النبضات تتطابق جزئيا مع معدل تكرار الموجة المركبة.

بجميع الاحتمالات ما نسمعه كنوعية الصَوت يعتمد بشكل كبير على المجموعة الأولى من النبضات، بينما درجة الصَوت المدركة لأصوات الكلام تعتمد على المجموعة الثانية. الأذن قادرة على التمييز بين عدد كبير من درجات الصوت المختلفة. أما بالنسبة لما يمكن تحديده من عدد الاختلافات في درجة الصَوت فيعتمد على الأساليب التجريبية المستخدمة. في إحدى أنواع التجارب المخبرية تبين أن التنوع في التردد الذي يمكننا تتبعه والكشف عنه كتغير في درجة الصوت حوالي 2 أو 3 هيرتز نغمات بترددات أقل من 1000 HZ. بالنسبة للنغمات الأعلى، يجب أن يكون هنالك تغير كبير متزايد قبل سماعنا أي تغير في درجة الصَوت. يبين الشكل 6-3 مجموعة من القيم بالنسبة لحساسية الأذن تجاه التغيرات في التردد، كما يمكنك رؤيته، إن التغير في التردد في النغمات الأعلى والذي بالكاد يمكن سماعه كتغير في درجة الصَوت هو إلى حد ما يشكل نسبة ثابتة، حوالي 500/1 أو 0.2% من تردد الصَوت.

وهكذا، فالاختلاف الممكن ملاحظته في التردد عند 3,000 HZ حوالي 0,002 X 3,000، بمعنى آخر 6HZ، وعند 7,000 HZ تقريبا 7,000 X 0,002 بمعنى آخر 14 HZ، نحن لسنا جيدين تماما في الكشف عن التغيرات في الأصوات المركبة مثل الصوائت، يجب أن يكون هناك تغير حوالي 8 هيرتز في مكوَن تردد 1,000 HZ قبل أن نتمكن من سماع تغير في النوعية.

وحيث أن الأذن أكثر حساسية للتغيرات في الترددات الواقعة في الجزء السفلي من المقياس،فإن الاختلاف في درجة الصوت بين نغمتين ترددهما 600 HZ و 700

HZ سيكون أكبر من الاختلاف بـين نغمتـين ترددهمـا HZ 3,600 و HZ 3.700 ، سيكون هنالك حـوالي (35) اختلافـا ملحوظـا في الـتردد بـين الـزوج الأوّل مـن النغمات، لكن في الزوج الأعلى سيكون هنالك 14 فقــط.وفي هـذه المنطقـة يجـب أن تفصل بين النغمات بمقدار 250 هيرتز تقريبا لعمل اختلاف في درجة الصَوت مقـابل الاختلاف بين HZ 600 و HZ 700.



شكل 6-3 رسم بياني يوضح المقدار الذي يجب تبديله لنغمة كي يحدث تغير في درجة الصوت.

يمكنك ملاحظة هذا التأثير بنفسك عن طريق عزف نغمات على البيانو. اعزف زوجا من النغمات يفصل بينهما نغمتين أخريين عند نهاية (bass) في البيانو، والآن اعزف زوجين من النغمات يفصل بينهما كذلك نغمتـين عنـد نهايـة (treble). إننـا سندرك سماعا إن الزوج الأول من النغمات متباعدتان بشكل أوضح ممـا هـو عليـه الزوج الثاني من النغمات.

غالبا ما نرغب بتمثيل الاختلاف في درجة الصوت المدركة بين نغمتين بواسـطة رسم بياني يوضح الاختلاف في التردد، ولأغراض متعـددة سـيكون مـن الملائـم لـو أمكننا تمثيل الفترات المتساوية من الزمـن في درجـة الصَـوت بواسـطة نقـاط متبـاعدة بالتساوي على الرسم البياني. لعمـل هـذا نريـد أن نعـرف العلاقـة بـين تـردد نغمـة وارتفاعها على مقياس درجة الصوت. اكتشفت هذه العلاقة عن طريق عدة تجـارب سيكولوجية، توضح جميعها بأن الأذن تسلك مسلكا معقدا جدا. ولكن كقاعدة أولية

باستطاعتنا القول بأن درجة الصَوت المدركة لنغمة ما تتزايد خطيا عندما يكون التردد بين 100 هيرتز و1.00هيرتز، بحيث يكون على سبيل المثال، الفرق في درجة الصَوت بين نغمات بتردد 300HZ و 450 HZ هو إلى حد كبير نفس الفرق بين نغمات بتردد 450 HZ و 600 HZ، 750 HZ و 900 Hz. ولكن بين 1,000 HZ و 10,000 HZ، العلاقة بين درجة الصوت التي نسمعها والتردد الفعلي لنغمة ما يسميه علماء الرياضيات ب

(اللوغاريتمية) (Logarithmic)، هذا يعني أن فترة درجة الصَوت بين نغمتين ضمن هذا المدى تعتمد على نسبة الترددين، وهكذا، على سبيل المثال، من 3,000 HZ 1,500 HZ –

(بنسبة 1:2) ومن – 4000 إلى 8000 أيضا بنسبة (1:2) هي فترات زمنية متساوية في درجة الصَوت على الرغم من أن الزوج الأوَل من الأصوات يفصل بينهما 1,500 هيرتز بالمقارنة مع 4000 HZ التي تفصل الزوج الثاني.

وهناك طريقة أكثر دقة في تمثيل الفروقات في درجة الصَوت باستخدام مقياس mel أو barkscales. و mel يعرف بأنه وحدة قياس درجة الصَوت. عندما تنفصل أزواج الأصوات بعدد متساو من (mels) فإن تلك الأزواج أيضا تنفصل بفواصل زمنية متساوية من درجة الصوت. استمدت هذه الوحدة من عدد كبير من التجارب السيكوفيزيائية حيث طلب من العينات المدروسة أن تحدد متى كانت نغمة تساوي نصف درجة صوت أخرى، ومتى كان صوتا متوسطا في درجة الصوت بين نغمتين أخرتين. لقد مكنت تلك التجارب من إيجاد رسم بياني يوضح العلاقة بين تردد نغمة ما وقيمتها على مقياس (mel). واستخدمت مجموعة أخرى من التجارب السيكوفيزيائية في إنتاج (bark scale) وهذا المقياس يعكس أيضا حساسية الأذن للاختلافات في درجة الصوت، في هذه الحالة كان المنهج المتبع هو تحديد سعة نطاق

(حزمة) الضجيج التي تكون فيها نغمة نقية بتردد معين غير ممكن سماعها.

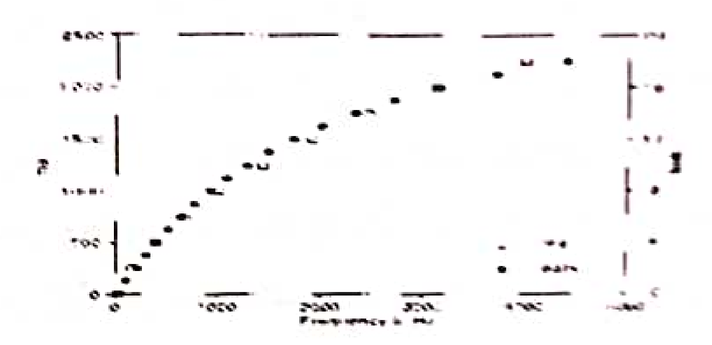
إنَ مقياس (mel) و (bark scale) يمثلان اختلافات بسيطة في وجهات النظر حول العلاقة بين درجة الصوت.(pitch) والتردد (frequency). جدول

6-1 يبين قيم mel و bark لترددات معينة. الشكل 6-4 يبين نفس البيانات في رسم بياني. يمكنك استخدام هذا الرسم البياني لإيجاد قيم mel و bark لأي تـردد معـين ب Hz. إنه من الواضح بأن 1,000 هيرتز مساوية ل 1.000 مل وحـوالي(8.5 bark و 2.000 Hz تعادل حوالي 1,550 مـل و 13 bark) وغالبـا مـا تحـول معلومـات التردد التي نحصل عليها لأصوات الكلام إلى وحدات ال(mel) أو ال (bark) قبـل أن تمثل بيانيا.

لننتقل الآن إلى دراسة علو (Loudness) الأصوات المختلفة. لقد رأينا سابقا بأن علو الصوت يعتمد بشكل أساسي على سعة الموجـة، فيمـا مضـى كنـا نسـتخدم مصطلح السعة بطريقة عامة للإشارة إلى أي تنوَع فوق أو تحت ضغط الهواء الطبيعـي، لكن دعنا نفترض بأننا أردنا أن نقـارن سـعة صوتـين لهمـا نمطـا موجـة موضحـان في الشكل 6-5. لعمل مقارنة صحيحة، يجب أن لا نكتفي بدراسة السعات القصوى بـل يجب أن نأخذ بعين الاعتبار معدلات جميع التنوعات ابتداء مــن الضغـط الطبيعـي في كل من هذين النمطين.

Table 6.1 The Relation between Frequencies in hertz, mels, and bark

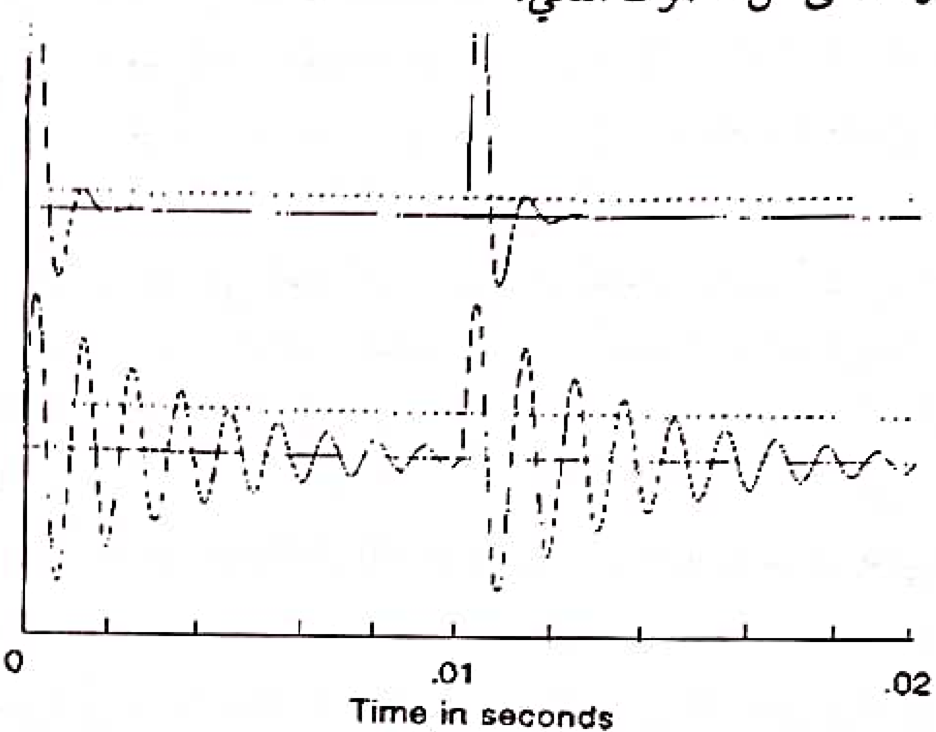
Frequency in Hz	Pitch in Mels	Frequency in Hz	Pitch in Ba
20	0	20	0
160	250	100	1
394	500	200	2
670	750	300	3
1,000	1,000	400	4
1,420	1,250	510	5
1,900	1,500	630	6
2,450	1,750	770	7
3,120	2,000	920	8
4,000	2,250	1,080	9
		1,270	10
		1,480	11
		1,720	12
		2,000	13
		2,320	14
		2,700	15
		3,150	16
		3,700	17
		4,400	18



شكل 6-4 رسم بياني لتوضيح العلاقة بين الترددات بالهرتز والقيم المناظرة على مقياسين مختلفين لدرجة الصوت

والآن إذا قمنا بعمل معدل رياضي دقيق، ستكون النتيجة صفرا، حيث أن كل زيادة لربما يقابلها بالضبط تناقص متتابع في الضغط، بالتالي إنه من المفيد الإفادة من وسيلة رياضية تعطينا نموذجا آخر لمعدل يعرف كقيمة rms (معدل الجذر التربيعي) (root-mean –square)، والذي يتماشى مع أفكارنا البديهية حول معدل سعات هذين النمطين الموجيين.وإن لم تكن على معرفة جيدة في الرياضيات يمكنك ببساطة اعتبار الـ(r m s) للسعة كنموذج مفيد لمعدل تنوعات الضغط في صوت ما ولا تقلق بشأن تفاصيل الطريقة التي نصل بها إلى هذا المعدل. إن الطريقة التي نستنبط من خلالها هذا المعدل هي تربيع جميع قيم النقاط التي يمر من خلالها الخط (ويحوّلها جميعا إلى قيم موجبة مثل 2- X 2- = 4 +)، ثم خذ متوسط حساب (أو معدَل) هذه القيم، وثم خذ مربع جذر هذه الكمية. هذه القيمة هي مقياس لمعدل تنوع ضغط الهواء، إن

قيم (r ms) لسعات الموجات موضحة في الشكل 6-5 وهـي مبينـة بواسـطة خـط متقطع. في حالة هاتين الموجتين، إن تلك التي لهـا قمـة السـعة الأصغـر (أي، أصغـر أقصى تنوع في ضغط الهواء) لها معدل الجذر التربيعي الأكبر r ms للسعة. وحيث أن علو الصوت يعتمد على معدل الجذر التربيعي للسعة وليس على سعة القمـة، يكـون الصوت الأوّل أعلى من الصوت الثاني.



شكل 6-5 موجتان كبيرتان، عند عقد المقارنة بين علو كل منهما، يتعين علينا أن نأخذ بالحسبان سعات rms الظاهرة على شكل خطوط منقطة بدلا من قمم سعة الموجات

إلى أن نعرف فقط ما إذا كانت سعة الواحد أكبر مـن سـعة الآخـر، ولكـن إذا أردنا القول بكم أو إلى أي درجة يكون الصوت الواحد أعلى، علينا أن نقـارن شـدة الصوتين. إنَ شدة الصَوت تعتمـد علـى مربـع السـعة. وهكـذا، إذا ضوعفـت سـعة صوت ما، فـإن الشـدة تـزداد بمقـدار "اثنـان تربيـع" أو بعبـارة أخـرى(أربعـة). وإذا ضوعفت السعة ثلاث مرات فإن الشدة تزداد تسعة أضعاف وهكذا فإن شدة الصوت تتناسب طردياً مع مربع الاتساع. وكما سنرى إن الاختلافات في الشدة بين الأصوات غالبا ما تكون ضخمة.

إن القيمة الحقيقية (الفعلية) لشدة الصوت يمكن تحديدها بالضبط بواسطة وحدات يستخدمها الفيزيائيون وبالمثل، يمكن تحديد السعة وفقا للوحدات التي يستخدمها الفيزيائيون في قياساتهم لضغط الهواء،والعادة المتبعة هي تبني مرجعية لصوت له سعة 0.0002 dynes لكل سم، وشدة 10-16 واط لكل سم2. على أيَ حال، لا داعي لأن نشغل أنفسنا بطبيعة هذه القيم المطلقة للشدة أو بسعة للصوت وسنكتفي ببيان قيمها بالنسبة لغيرها من الأصوات لأننا عادة لا نلتفت إلى القيم وبمجرد أن نتخذ مقياساً مرجعياً متفق عليه لمستوى الشدة، نستطيع اعتبار سعة الصوت أو شدته على أنها أقل أو أكثر من شدة الصوت المرجعي.

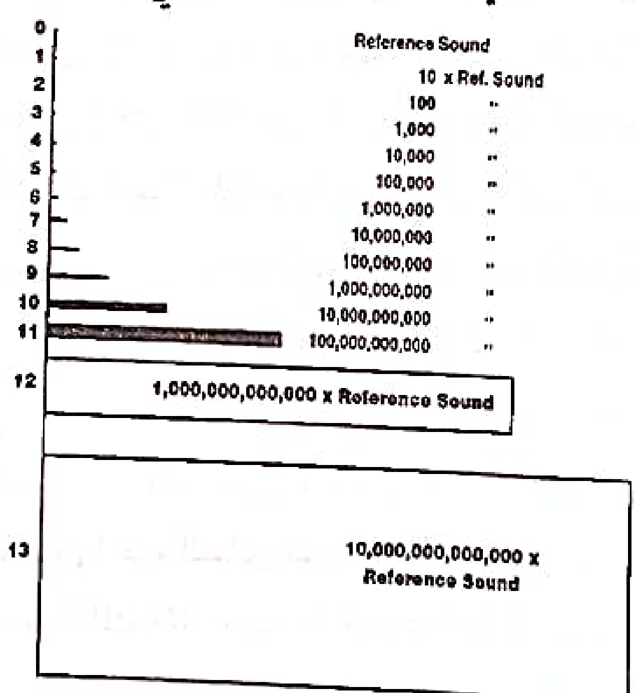
الصوت المرجعي المحدد أعلاه هو ذلك الصوت الذي لا يبلغ مقدار علوه علو أكثر الأصوات هدوءا والذي يمكن سماعه تحت ظروف تجريبية ملائمة، إن الصوت الأعلى الذي يمكننا أن نتحمله دون الإحساس بألم في آذاننا تصل شدته إلى ما يزيد بمقدار 1،000،000،000،000 مره كما هو محدد للصوت المرجعي.(وهذا يعني بالطبع بأن سعته تزيد بمقدار1،000،000مرة عما حددناه للصوت المرجعي).

يوضح الشكل 6-6 شدة الأصوات التي تتكون من ثلاث عشرة خطوة متساوية تقريبا في درجات علوها ابتداء من المستوى المرجعي وذهابا إلى النغمة الأعلى التي يمكن أن نتحملها دون استشعار للألم. وكما ترى، فإن الاختلاف في الشدة (مقاسا بالواط / سم^2) يبدو متباينا جدا بين الخطوتين الثانية عشرة والثالثة عشرة فهو أكبر بكثير من الاختلاف بين الخطوتين المتاليتين واحد واثنين.إلا أن نسبة القوة بين أي خطوتين متتاليتين يبقى ثابتا.

اعتمد علماء الصوت مقياس الدسبل (the decibel scale) لأن الاختلافات في الشّدة بين الأصوات كبيرة جدا، هذا من ناحية ومن الناحية الأخرى لأن الاختلافات في العلو تعتمد على نسبة شدة الأصوات أكثر منها على القيم الحقيقية. ويعرّف الفرق في قيم الدسبل المعطاة لصوتين على أنه عشرة أضعاف اللوغاريتم لنسب الشدة المعطاة لها.

في الحقيقة ليس الأمر على هذه الدرجة من التعقيد التي يبدو عليها، ويجب أن يبدو مفهوما حتى من قبل الذين نسوا معنى اللوغريتم. إن الجدول 6-2 سوف يساعد في توضيح الأمور.

وكما ترى من الجدول، كل ما هو مطلوب منك عمله لإيجاد اللوغاريتم المشترك لنسب الشدة الموضحة في الجدول هو أن تعد عدد الأصفار. إن الفرق في الدسيبل بين أي صوتين يمكن إيجاده عن طريق ضرب هذا الرقم في 10. إذا طبقنا هذه الطريقة على نسب الشدة المبينة في شكل 6-6 نجد بأن اللوغاريتم المشترك لنسب الشدة بين أعلى صوت يمكن للأذن البشرية أن تتحمله والصوت المرجعي هو ثلاثة عشر لأن هذا الرقم يحتوي على ثلاثة عشر صفرا.إن الفرق في الدسبل أو(d.B للاختصار) بين هذين الصوتين هو عشرة أضعاف هذا الرقم بما معناه 130 دسيبل. وبالمثل، الفرق في الدسيبل، على سبيل المثال، بين الخطوتين 3و4 هو عشرين دسيبل، لأن الشدة عند الخطوة 4 تساوي مائة ضعف الشدة التي نجدها عند



شكل 6-6 مستويات شدة الأصوات بتشكيلة مؤلفة من ثلاث عشرة

خطوط متساوية تقريبا حسب العلو. وشدة كل صوت تقاس بالوات/ سم؟

Table 6.2 The Relation between the Amplitude (Power) of a Sound and Its Relative Level in Decibels

Power Ratio between Sounds	Common Logarithm of the Power Ratio	Difference in Decibels
10 to 1	1	10
100 to 1	2	20
1,000 to 1	3	30

الخطوة 3، واللوغاريتم المشترك لـ100 هو 2. وهذا بالطبع هو نفس الفرق بين الخطوتين 6و8، أو أي خطوتين اثنتين لهما نسبة شدة مائة إلى واحد.

وهكذا يمكنك أن ترى فوائد استخدام مقياس الدسبل. إن كل خطوة في الجدول 6-6 تتطابق مع زيادة مساوية في علو الصوت. إن الفوارق في الشدة تتفاوت بشكل كبير. ولكن هذه الاختلافات عندما تقاس بالدسيبل فإن كل خطوة تبدو نفسها.

باستخدام نظام الدسبل، فإن الأرقام غير الملائمة تتناقص لحد معقول، وكذلك الاختلافات في الشدة بين الأصوات يمكن تحديدها بطريقة تتلاءم ألي حد كبير مع أفكارنا حول العلو. هنالك على الأكثر 10% من الخطأ عند موازنة انطباعاتنا عن الاختلافات في علو الصوت بالاختلافات الفعلية المقاسة بالدسيبل بين الأصوات.

بالطبع إن القاعدة التي أعطيناها لإيجاد اللوغاريتم المشترك لأي رقم تنطبق على الأرقام: 10 أو 100 أو 1.000، الخ. عندما تكون نسبة الشدة بين صوتين من ذات قيمة متوسطة مثل (1 : 4)، علينا استخدام جداول اللوغاريتمات كخطوة أولى لإيجاد الفوارق بالدسيبل (dB) بين الأصوات. الجدول 6-3 يعطيك فكرة عن بعض القيم المتوسطة. في الجزء السابق من هذا الكتاب تحدثنا عن سعات الأصوات بدلا من شدتها، وتبعا لذلك فقد خصصنا عمودا لتبيان نسب السعة.

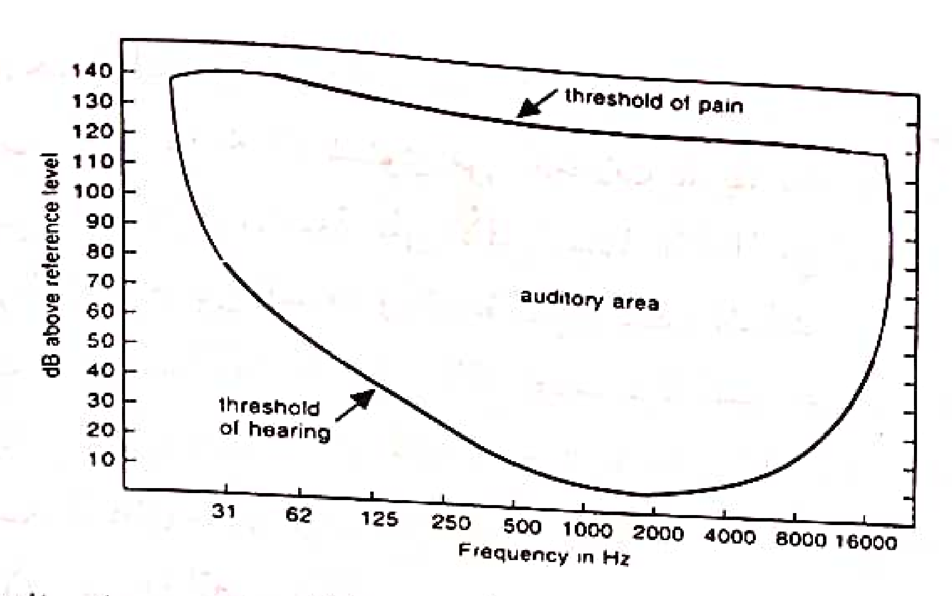
إن القيم المعطاة في السطر الأول من الجدول 6-3 مهمة بشكل خاص. إنها تبين بأنه عندما تكون شدة أحد الأصوات نصف الآخر، فإن سعة الصوت الأول تعادل 0.707 مرات من الثاني (وبما أن الشدة تعتمد على مربع السعة، فإن0.707 مرفوعا إلى القوة يساوي 0.5، أي النصف).وكما ترى فإن لوغاريتم نسبة الشدة هو0.3، وهكذا فإن مستوى شدة الصوت الأعلى يساوي 3 دسبل.وهذه القيم مهمة

كما أوضحنا في الفصل السابق. سعة النطاق الفعالة لمرنان، هي النطاق الذي سيتجاوب المرنان من خلالة لمستوى من المدخلات بطريقة تكاد تكون جميع الترددات فيها ضمن هذا النطاق لها سعة على الأقل نسبتها 70.7% من السعة الأكبر، والآن، وقد فسَرنا الارتباط بين السعة والشدة لنرى كيف نشأت القيمة 70.7%. جميع التردداث ضمن هذا المدى لها على الأقل نصف قوَة أقصى حد للمخرج وبناء عليه، هذا المقياس لفعالية مدى المرنان غالبا ما يعرف كنصف شدة سعة النطاق، لقد قمنا بقياس سعة النطاق لمرنان أو مرشح مشيرين إلى أنَ الترددات التي تكون 3dB تحت التردد الأساسي لها أقصى سعة.

Table 6.3 Power Ratios and Amplitude Ratios

Power Ratio	Amplitude Ratio	Log of the Power Ratio	Difference in Decibels
0.5 (or 1 to 2)	0.707	0.3	3
0.25 (or 1 to 4)	0.50	0.6	6
0.10 (or 1 to 10)	0.32	1.0	10

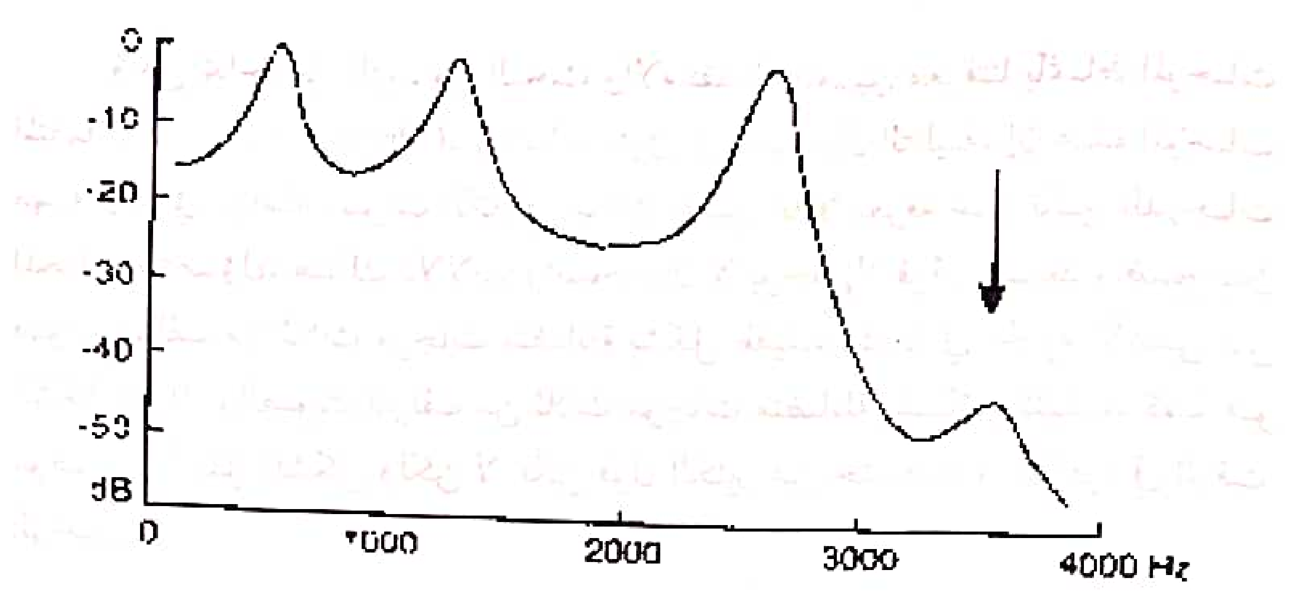
في بداية الفصل الذي يدور حول السعة والشدة قلنا بأن الصوت المرجعي هو ذلك الصوت الذي يضاهي علوه علو أنعم الأصوات التي يمكن للأذن أن تتبعه في ظروف تجريبية ملائمة. في الواقع،إن مستوى شدة الصوت الذي يجب أن يكون عليه كي نتمكن من سماعه تعتمد على التردد الأساسي للصوت. نستطيع سماع أصوات في منتصف مدى التردد الأساسي عندما تكون هذه الأصوات أقوى بقليل من الصوت المرجعي، ولكن أصواتا منخفضة جدا أو أصواتا مرتفعة جدا، يجب أن تكون أكثر من قوية قبل أن نستطيع سماعها. المنحنى الأسفل في الشكل 6-7 يبين مدى القيم التي يمكن استخدامها لشخص شاب سمعه طبيعي، كما ترى عندما تكون النغمة بتردد 125 HZ بالكاد تسمع، فهي 30dB أقوى من النغمة التي بالكاد تسمع بتردد 2,000 HZ، بعبارة أخرى إن الأذن تكون أكثر فعالية في الوسط من مداها، إنها تحتاج لقوة أكثر من أجل أن تسمع نغمات أخفض أو نغمات أعلى، إذا ما تحركنا وراء حدود تردد معين، لا يكون هنالك إحساس بالصوت، مهما كانت قوة الاضطراب في الهواء، ذلك لأن جزءا من آلية السمع لا يمكن أن نجعلها تهتز عند هذه الترددات المرتفعة جدا أو المنخفضة جدا.



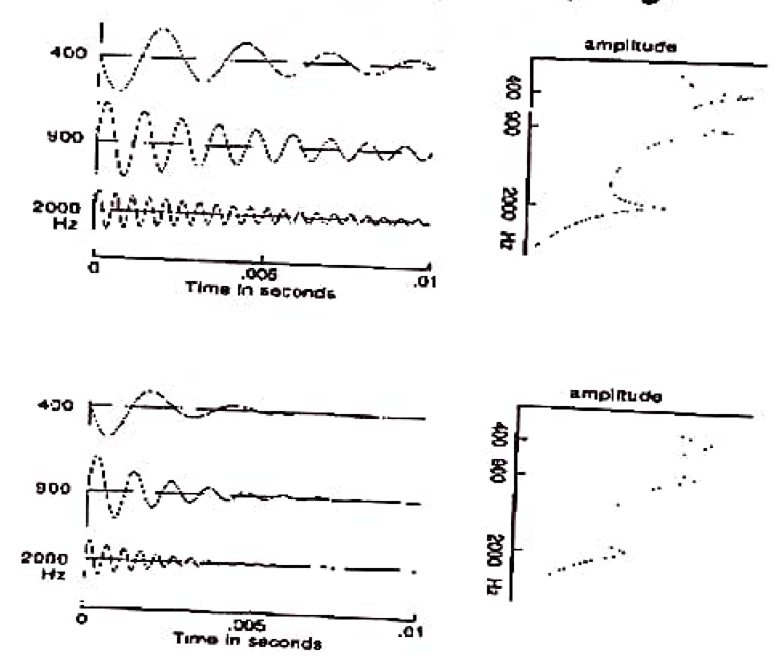
شكل 6-7 رسم بياني يوضح أقصى حد وأدنى حدّ لترددات وسعات النغمات المسموعة

الخط الأعلى في الشكل 6-7 يمثل المستوى الذي تبدأ عنده الأصوات بالتسبب في الشعور بالألم في الأذن. إذا ازدادت تدريجيا شدة صوت ما لأي تردد حتى تصبح 130dB فوق المستوى المرجعي، سيكون هنالك شعور بعدم الارتياح، وبناءً عليه، الشكل 6-7 يوضح مدى الاحساسات السمعية الممكنة، جميع التنوعات المسموعة في ضغط الهواء يجب أن يكون لها ترددات وسعات تقع ضمن المدى المشار إليه.

فيما مضى في هذا الفصل لم نذكر شيئا بخصوص الاختلافات في نوعية الأصوات. لأننا نناقش عادة نوعية الصوت في ضوء الترددات وسعات مكوّناتها، بمعنى، في ضوء طيفها، هنالك على أي حال، عامل أو عاملان إضافيان يجب أن نأخذهما بعين الاعتبار، أهم هذه العوامل : ظاهرة تدعى (masking)، يقال إن الصوت الأول مقنع بصوت ثان عندما لا يمكن لنا سماعه بسبب وجود صوت آخر. معظم العمل في هذا الموضوع نفَذ باستخدام النغمات النقية بخلاف الأصوات المعقدة كأصوات الكلام، لكن العمل الذي قمنا به يوَضح على سبيل المثال، إذا كانت سعة نغمة نقية بتردد 3,500 HZ، 40dB أخفض من سعة نغمة بتردد 2,500 HZ، عندها فإن نغمة 3,500 HZ لن تسمع لأنها مقنعة (masked) بالنغمة الأخرى. إنَ هذا النوع من العمل على أهمية كبيرة في اعتباراتنا لإدراك أصوات الكلام، إنه يبين أنه في أصوات كتلك الموضحة في الشكل 6-8 القمة المميزة بسهم ليست مهمة من وجهة نظر المستمع، لأنه لا يمكن سماعها في وجود مكونات أخرى بسعات أكبر.



شكل 6-8 طيف صوت مركب حجبت فيه مكوّنات القمة (المشار إليها بالسهم) من قبل مكوّنات أخرى بسعات أكبر منها.



شكل 6-9 صوتان يتألف كل منهما من ثلاث موجات متضائلة.القمم في طيف الصوت في الجزء الأسفل أوسع من تلك في الجزء الأعلى من الشكل وبالتالي، فإن المكوّنات في الجزء الأسفل من الشكل أكثر اضمحلالا. لا يوجد إلاّ فرق سمعي ضئيل بين هذين الصوتين.

ونحن بحاجة إلى المزيد من البحث والاستقصاء لتعميق معرفتنا بأنماط الموجات المتضائلة (damped waves)، و كما سنرى في الفصول التالية، إن هذه الموجات مهمة جدا في دراسة أصوات الكلام، هنالك الكثير مما لا نعرفه عن تأثير الدرجات المختلفة للتضاؤل، هنالك دلالات واضحة بأن لا يوجد إلا فرق بسيط واضح بين صوت مؤلف من ثلاث موجات متضائلة بشكل طفيف، كما في الجزء الأعلى من الشكل 6-9، والصوت المؤلف من ثلاث موجات متضائلة بشكل كثيف، كما هو موضح في أسفل الشكل ولكن لا يمكن قول الكثير عن حدود هذه الظاهرة في الوقت الراهن.

الفصل السابع

إنتاج الكلام

الفصل السابع

إنتاج الكلام

إننا عندما نتكَلم نستخدم ألسنتنا وشفاهنا وأعضاء صوتية أخرى لإنتاج أصوات الكلام المختلفة. وفي هذا الفصل سنتناول بالدرس التنوعات في ضغط الهواء الخاصة بكل صوت من أصوات الكلام. إنه ليس من أهداف هذا الكتاب عرض تفسير مفصَل لكل أصوات النطق المتعددة. بكل بساطة، سندرس بتمعن بعض الأصوات الأساسية التي تحدث في اللَغة الإنجليزية.

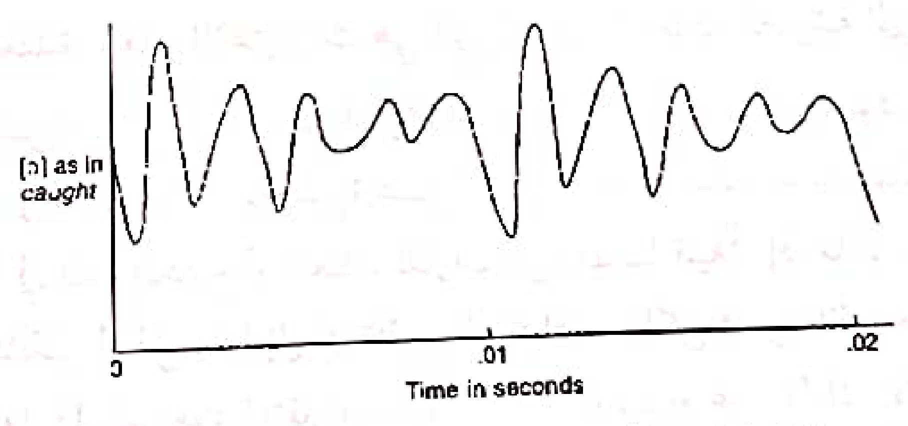
أشرت في الفصل الأول بأنه يجب أن يكون لكل صوت حركة مطابقة من مصدر الصوت. في إحداث معظم أصوات الكلام تقوم اهتزازات الهواء في الممرات:- الفم، الحلق، الأنف (والتي تعرف بمجموعها بالقناة الصوتية) بتحريك موجات الأصوات. تنتهي القناة الصوتية عند طرف من أطرافها بالأوتار الصوتية بينما ينتهي الطرف الآخر بالشفاه والمنخرين، وهكذا فهي تشكل حجرة رنين شكلها معقَد. عندما يبدأ الهواء بالحركة داخل هذه الحجرة بفعل ضربة حادة، فإنه يهتز بطريقة معقَدة، وهذه الاهتزازات هي التي تسبب الموجات الصوتية التي نسمعها.

الضربات التي تتسبب في اهتزاز الهواء في الفم والحلق تعود إلى أداء الأوتار الصوتية، والأوتار الصوتية عبارة عن أوتار صغيرة عضلية مدعمة بغضاريف في الحنجرة. في أثناء الكلام أو الغناء، تقترب من بعضها قليلاً. إذا ما تم دفع الهواء، فإنَ ضغطا يتشكل أسفل منها إلى أن تنفرج أو تتباعد. ولكن بمجرد انفراجها، فإن الضغط أسفل منها يقل ثم تعود للاقتراب مرة أخرى - وينتج عن ذلك الاقتراب اشتداد الضغط ومرَة أخرى تعود لتنفرج، هذه الدورة تتكرر بسرعة جدا إلى أن يتوقف دفع الهواء من الرئتين للخارج، وحتى يعدَل وضع الحبال الصوتية. وفي الحقيقة إنَ اندفاع

تيار الهواء بين الأوتار الصوتية يسبب امتصاصها بحيث أنها تغلق فتحة المزمار بشكل حاد،وهذا التغير المفاجئ في ضغط الهواء الذي يحصل عند اقتراب الأوتار الصوتية من بعضها يعمل كضربة للهواء في القناة الصوتية ويسبب اهتزازها.

يهتز الهواء في القناة الصوتية بطرق مختلفة عندما تكون الأعضاء الصوتية في أوضاع مختلفة. كما رأينا في الفصل الخامس، الطريقة التي تهتز فيها كمية الهواء تعتمد على شكلها وحجمها. التنوعات في شكل القناة الصوتية وحجمها يتحددان بشكل كبير تبعا لحركات اللسان، والشفاه، والحنك الرخو (الطبق). وبناءً عليه سيكون هنالك طريقة مميزة لاهتزاز الهواء منسجمة مع كل وضع للأعضاء الصوتية تلك.

يمكننا الآن أن ندرك كيف تم توليد أنماط الموجات الخاصة بالصوائت التي ناقشناها في الفصل الثالث. شكل الموجة للصائت [ɔ:] كما في كلمة caught مكرر هنا في الشكل 7-1. وكما لاحظنا سابقًا، إنها مكوّنة من سلسلة من الموجات المتضائلة، تعاود الحدوث عند الاقتضاء بمعدّل مائة ذبذبة لكل ثانية. كل من هذه الموجات المتضائلة تحدث بواسطة اهتزازت الهواء في القناة الصوتية، والتي كل مرة تعاود الحدوث عندما يكون هنالك نبضة من الأوتار الصوتية. طالما أن الأعضاء الصوتية تتخذ المواضع المخصصة بهذا الصائت، وطالما أن الأوتار الصوتية ماضية في إنتاج نبضات، ستتولد (ستنشأ) سلسلة من الموجات المتضائلة بتردد حوالي 500 هرتز تقريباً.

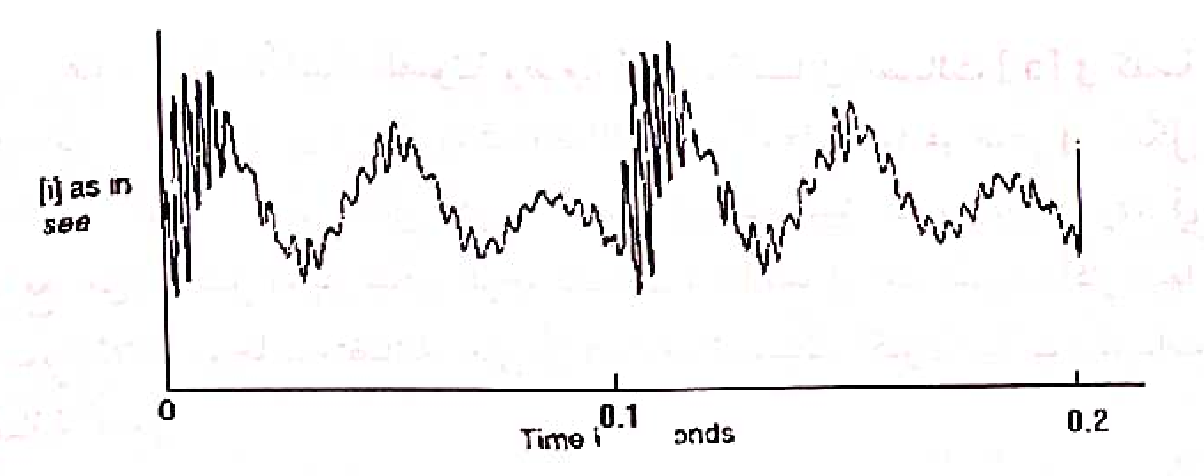


شكل 7-1 شكل الموجة للصائت [ɔ:] كما نطقها مؤلف الكتاب في الكلمة caught.

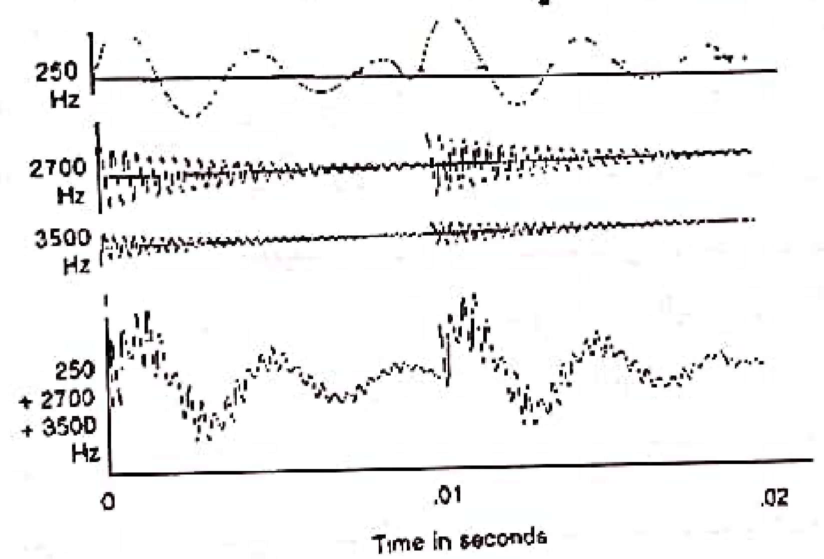
عندما تتخذ الأعضاء الصوتية وضعية أخرى، كما في الصائت [ɔ:] في كلمة see، فإن سلسلة أخرى من الموجات المتضائلة يتم توليدها. وكما هو ظاهر في الشكل 3-3، نمط الموجة له على الأقل مكونان أساسيان يمكن تمييزهما بالعين المجرَدة. في الواقع، من الأفضل اعتبار شكل الموجة للصائت [ɔ:] كما في see على أنه أكثر شبها بمجموع ثلاث موجات متضائلة، حتى أنَ هذا يعدَ تبسيطا، لكون هنالك مكونات إضافية أصغر.

في الشكل 7-3، تظهر موجات متضائلة لها ترددات مخصوصة. في كل مرة يكون هنالك نبضة من الأوتار الصوتية، يبدأ الهواء في الفم والحلق بالاهتزاز في آن واحد. يعرض الشكل ما يمكن أن ينتج عن هاتين النبضتين. الصوت [ɔ:] هو مجموع هذه الاهتزازات وله مكونات في الصورة الطيفية الخاصة به، بترددات متوافقة.

إنَ القمم في الصوَر الطيفية للصوائت (كما سنرى، لأصوات نطق أخرى أيضا) تنسجم مع الترددات الأساسية لاهتزازات الهواء في القناة الصوتية. وأساليب الاهتزاز هذه في القناة الصوتية تعرف بالترددات التوافقيـة (formants). الترددات التوافقية للصوت هي من مظاهره التي تعتمد مباشرة على شكل القناة الصوتية ، وهي مسؤولة إلى حد كبير على النوعية المميزة. الصائت [ɔ:]، كما لفظه مؤلف هذا الكتاب، مميز جزئيا بمكون تردده حوالي 500 هرتز، والصائت [ɔ] كما لفظه مؤلف هذا الكتاب، مميَز بمكونات تردداتها 250 و 2،700 و 3.500 هرتز. عندما تلفظ هذه الصوائت سيكون هنالك مكوَنات كبيرة نسبيا متوافقة مع الموجات المتضائلة مع هذه الترددات الأساسية. إنَ وجود هذه الترددات المميَزة (formants) هو ما يمكننا من تمييز الصوائت المختلفة المرتبطة مع الأوضاع المختلفة لأعضاء النطق.



شكل7–2 الشكل الموجي للصائت [ɔ:] (وفقا للفظ مؤلف الكتاب)



شكل 7–3 تكراران لكل من الموجات الثلاث المتضائلة. عندما يتم تجميع هذه الموجات فالناتج موجة صوتية شبيهة بموجة الصائت [i:] في كلمة see

كل حركة للأوتار الصوتيــة تتسـبب في اهـتزاز الهـواء المتواجـد حولهـا بـتردده الطبيعي (the formant frequencies). إذا تباعدت الأوتار الصوتية كـل واحـد مـن مائة من الثانية، ستبدأ الموجات المتضائلة بـالاهتزاز مائـة مـرة لكـل ثانيـة، وسـيتكرر حدوث نمط الموجة المركبــة المحـدث وراء الشـفاه علـى نفـس المعـدّل. وهـذه النقطـة موضحة في الشكل 7–4، والذي نشاهد من خلاله موجات الصوت المطابقة للصَـوت المصنَع الذي له شكل موجة أبسط لكنه على الغالب لا يمكن تمييزه عن الصائت [ɔ:] كما في caught. تظهر لدينا في الشكل أربعة نتائج لمواقف مختلفة :-

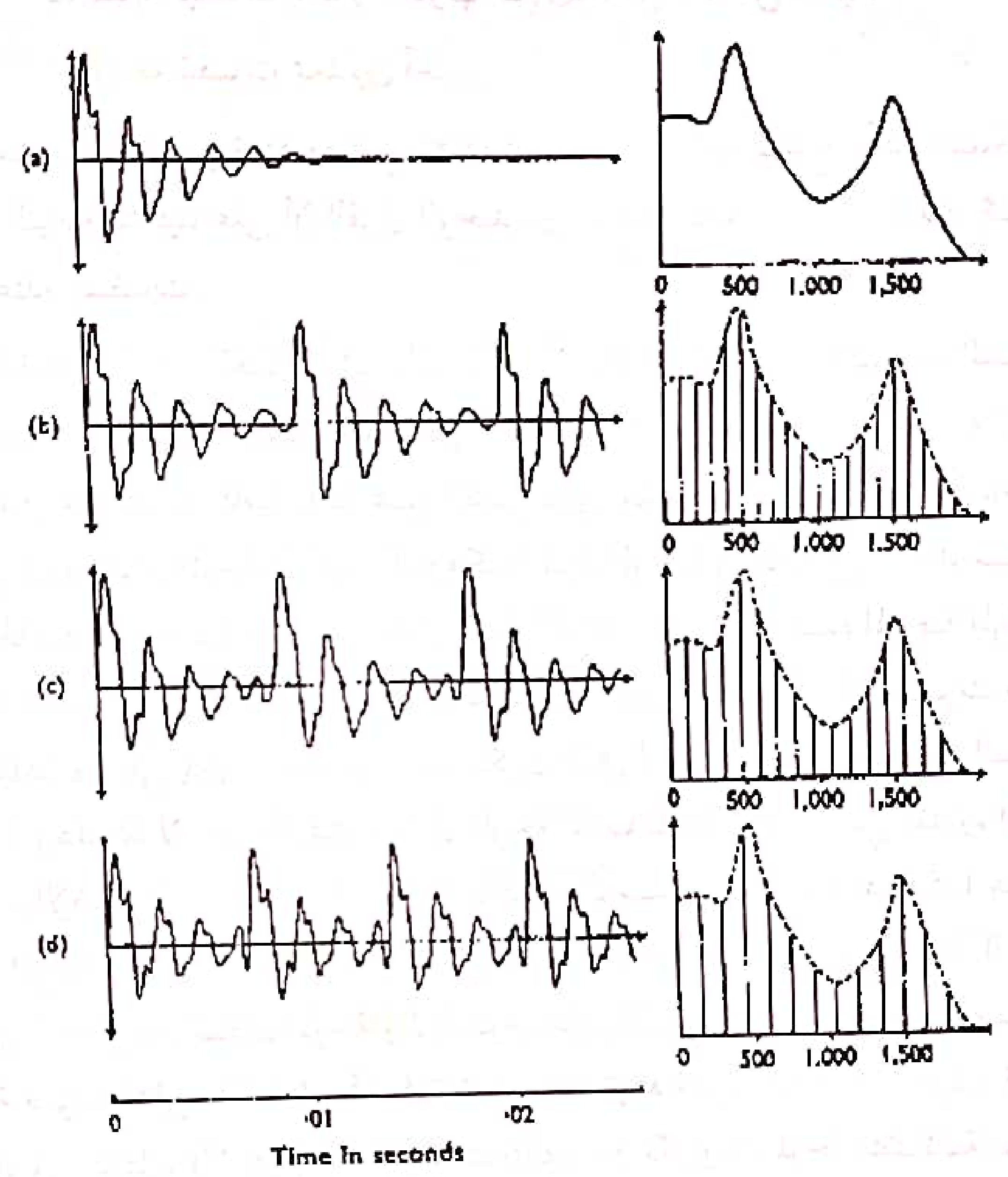
1) نتيجة نبضة مفردة.

2) نتيجة نبضات يتكرر حدوثها كل جزء من مائة من الثانية.

3) نتيجة نبضات بمعدلين آخرين.

استخدمنا مقياس تردد معياري (synthesizer)، مولف لإنتاج الأصوات،لهذه الرسوم البيانية للتأكيد على أنَ الفرق الوحيد بين الأصوات هو المعدَل الذي كانت تحدث عنده النبضات.

لقد شاهدنا في الفصل الرابع بأن الأنماط التكرارية للموجة كما في الشكل 7-4 bيمكن اعتبارها كمجموع عدد من المكوَنات، كلَ من هذه المكونات له تردد عبارة عن مضاعفات كاملة ناتجة عن الضرب في عدد صحيح للتردد الأساسي (بمعنى تردد تكرار الموجة المركبة). وهكذا فإنَ الموجة في الشكل 7-b4، سوف يكون لها مكوَنات عبارة عن مضاعفات كاملة للمائة، حيث أن هذه الموجة المركبة متكررة الحدوث مائة مرَة لكل ثانية. في الواقع إنَ الصورة الطيفية لهذا الصوت هي كما نشاهده على يمين الشكل7-4، المكوَن الذي له التردد 500 هرتز له السعة الأكبر (وهذا مما لا يثير الدهشة، بما أن الموجة المتضائلة لها تردد أساسي مقداره 500 هرتز)، بالإضافة إلى ذلك هنالك قمة أخرى في الرسم الطيفي بتردد 1.500 هرتز تطابق الموجات الأصغر المركبة على شكل الموجة المتضائلة الرئيسي. في c و d من الشكل 7-4 توجد أشكال الموجة والرسوم الطيفية لنفس الصوت شبه الصائت بدرجة صوت أعلى، بما معناه، تحدث نبضات عند تردد قدره 120،و 150 هرتز. كما تلاحظ في الشكل، فإن جميع هذه الموجات تتألف من تكرارات لموجة متضائلة بتردد أساسي هو 500 هرتز. وعلاوة على ذلك، جميع الرسوم الطيفية التي نشاهدها على يمين الشكل، تشبه الواحدة منها الأخرى. من الممكن رسم منحنى بقمم بتردد 500، و1.500 هرتز حولها جميعا، الاختلاف بين الصورتين الطيفيتين الأخيرتين يكمن في أنَ مكونات الترددات في الحالة الأولى أضعاف 120، وفي الحالة الثانية أضعاف 150، من هنا فقد مثلت بواسطة خطوط متباعدة.



شكل 7-4 أشكال موجية وطيوف لصائت مصنّع مماثلة للصائت [o] في caught

(أ) تأثير نبضة واحدة على نظام رنان

(ب) نبضات تتكرر بمعدّل سرعة 100 في الثانية

(ج) 120 نبضة في الثانية

(د) 150 نبضة في الثانية

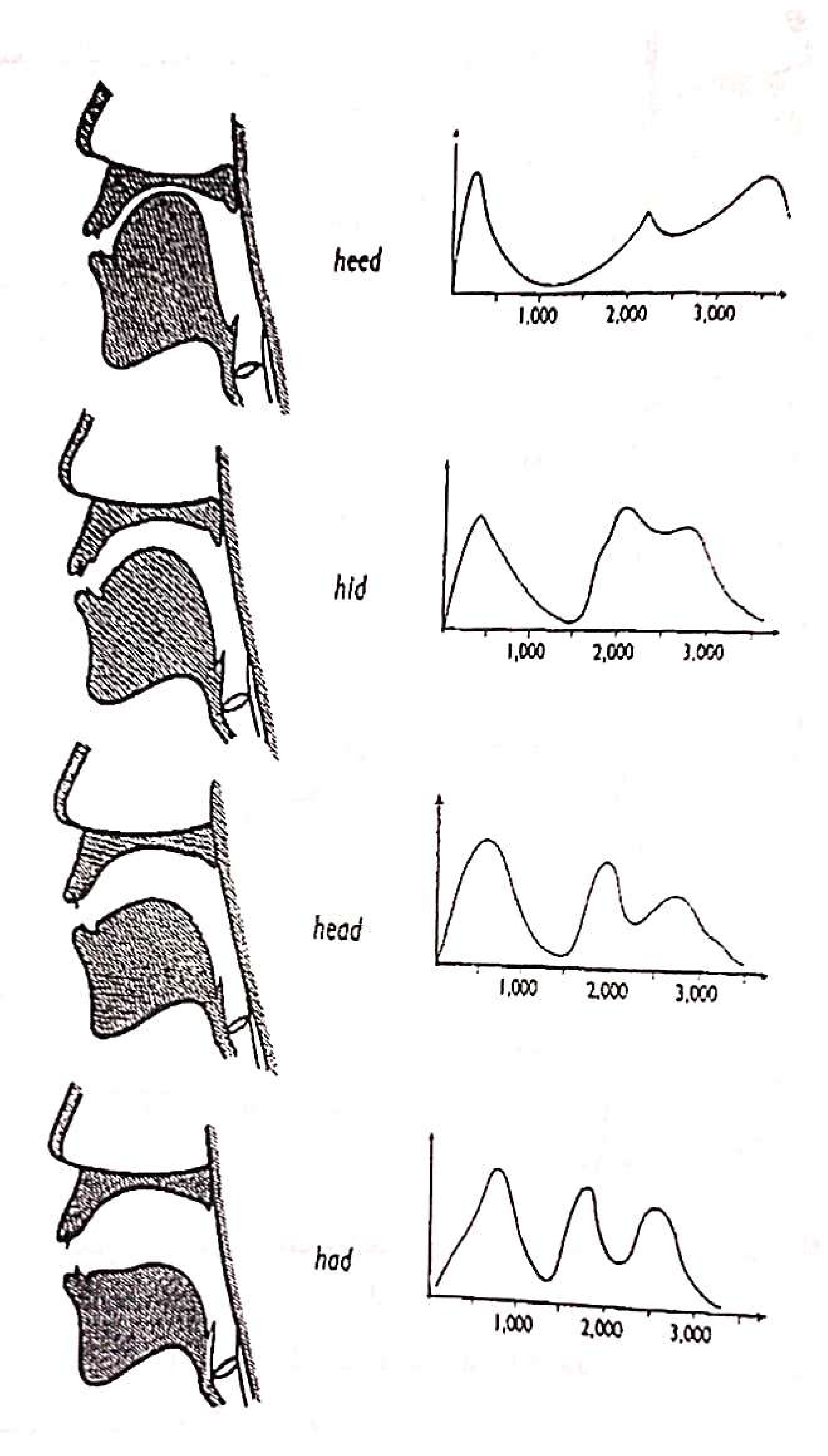
إن هذا التحليل بالطبع، هو وفقا للمبدأ المنصـوص عليـه في الفصـل الرابـع : عندما تتألف موجة مركبة من نمط موجة متضائلة متكررة في فترات زمنية منتظمة، فإن الترددات المتكونة سيكون لها دائمـا نفـس السـعات التقريبيـة كمكونـات موازيـة في منحنى مستمر يمثل الحدوث المنفصل للموجـة المتضائلـة، نتيجـة لذلـك، فـان تبديـل معدَل السرعة الذي تبدأ عنده الأوتار الصوتية بـإحداث نبضـات سـوف يؤثـر علـى التردد الأساسي للموجة المركبة، ولكنه لـن يبـدل الـترددات التوافقيـة (formants) (القمم في الرسم الطيفي)،و التي تتلاءم مع الترددات الأساسـية لاهـتزازات الهـواء المتضائلة في القناة الصوتية. إنه من خـلال هـذا الفـهم يمكننـا القـول، بـأن مكوَنـات الصَوت (formants) هي جزء من الصفـات الخاصـة الـتي تتحـدد وفقـا للأشـكال المختلفة لما يدور في تجويف الفم (the corresponding mouth shape)

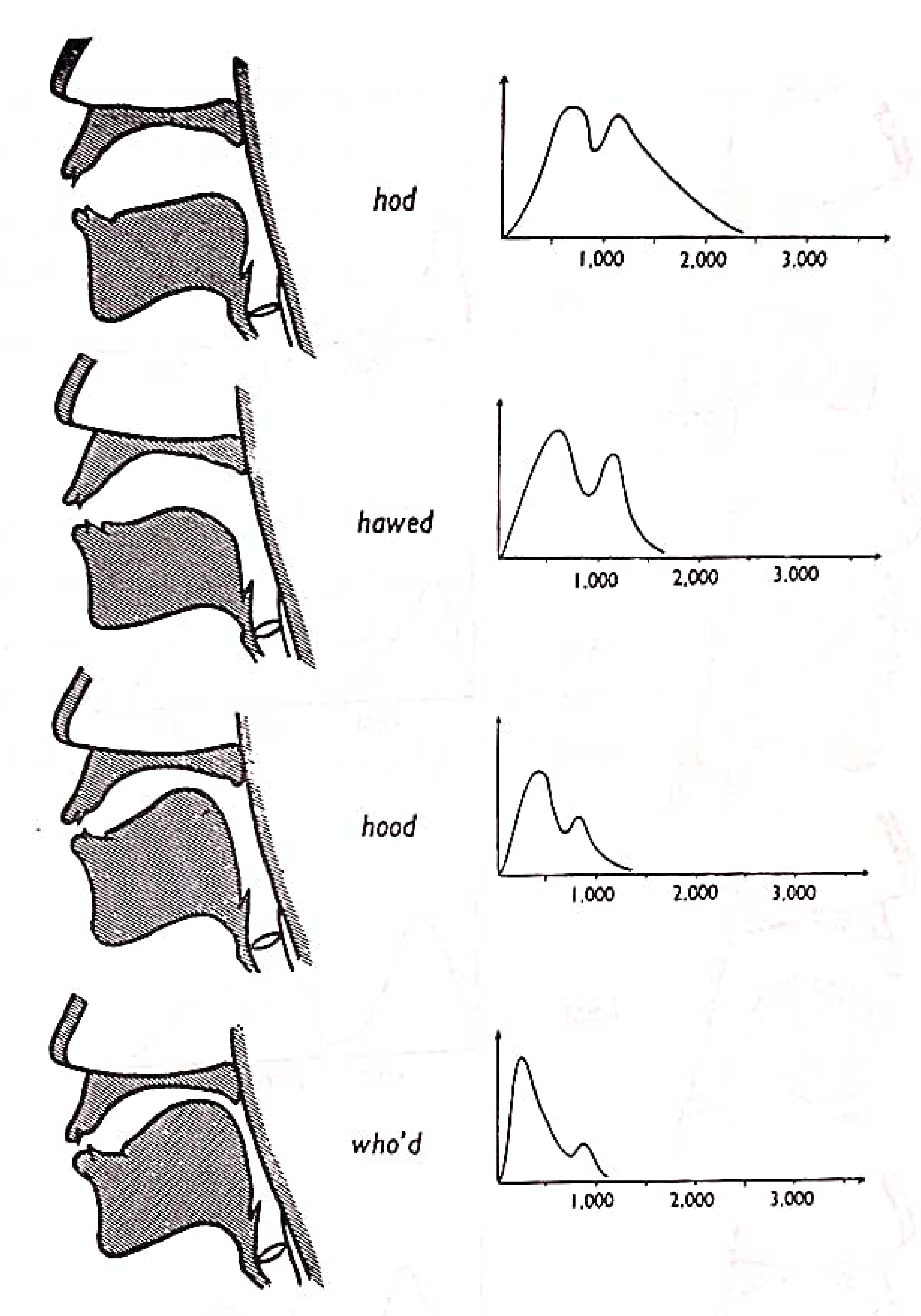
ولما كان المنحنـى المستمر كمـا في الشـكل 7-4 a الطريقـة الأوضـح في تمثيـل الترددات التوافقية (formants) التي تميز صائتا معينا بصرف النظر عن المعدَل الـذي تبدأ عنده الحبال الصوتية بإحداث نبضات، فإننا غالبـا مـا نسـتخدمه مفضلينـه علـى الصورة الطيفية الخطية عند حديثنا عن الطبيعة الأكوستيكية لنوعية الصائت، فنحن لا نصف صائتا باستعمال الطيـوف الخطيـة إلا إذا أردنـا أن نلفـت الانتبـاه إلى تـرددات أساسية معينة يتم استخدامها. (انظر الأشكال b، c، d من الشكل 7-4.

رأينا في الفصل السادس بأن درجة الصوت تعتمد بشكل أساسي علـى الـتردد الأساسي وبناء على ذلك، عندما يكون هنالك تنـوع في معـدَل السـرعة الـذي تبـدأ عنده الأوتار الصوتية بإنتاج نبضات، سيكون هنالك تغيَر في درجة الصوت،(بـالرغم من أنه لن يكون هنالك تغير في الترددات التوافقية/ formants، ومن هنا لا تغـير في نوعية الصائت المميزة). نحن نتحكم بالتغيرات في درجة الصوت عـن طريـق تعديـل العضلات التي تتحكم في عمل الأوتار الصوتية. عندما يزداد التوتر بحيث تمط الأوتار بشدة، فإنها تتحرك بسرعة أكبر، منتجة عددا أكبر مـن النبضـات لكـل ثانيـة ، وهـي المطلوبة لدرجة صوت عالية. من ناحية أخـرى، عندمـا ننطـق كلمـة بدرجـة صـوت خافتة، تقترب الأوتار من بعضها على نحو رخو، وهكذا فإنها إذا ما انفرجـت فإنـها تستغرق وقتا أطول حتى تعود إلى الوضع المغلق.

إنه من الممكن عادةً تبديل درجة الصوت الصائت، دون تبديل نوعيته المميزة لأن كل من هذه العوامل يتم التحكم بها بآلية فسيولوجية منفصلة. كما رأينا إن درجة الصوت تعتمد على أداء الأوتار الصوتية، والنوعية المميزة تعتمد بشكل كبير على الترددات التوافقية (formants)، التي لها قيم ثابتة معينة لكل شكل من أشكال القنوات الصوتية، في الشكل 7-5 نشاهد الرسوم الطيفية للصوائت التي أنتجها المؤلف في الأجزاء الوسطى من الكلمات التالية: , head, hid , head , had ,hod hawed, who'd

كذلك نرى الأوضاع المطابقة لها إبان نطق الأعضاء الصوتية لها، هذه المنحنيات تعطينا دلالة واضحة لمكونات التردد التي تميز كل صوت من هذه الأصوات. قد نفكر بأن كل قمة منها ترينا التردد الأساسي لكل واحدة من الموجات المتضائلة الموجودة، الصائت في الجزء الأوسط من كلمة had، على سبيل المثال، تميز بأن له مكوّنات بسعات كبيرة نسبيا في ثلاث نواحي رئيسة : حوالي 700، و1750، و 2600 هرتز. الموجات.


heed
1,000
2,000
3,000
hid
1,000
2,000
3,000
head
1,000
2,000
3,000
had
1,000
2,000
3,000



شكل 7-5 موضع أعضاء النطق (بناء على بيانات مستمدة من صور أشعة للمؤلف)

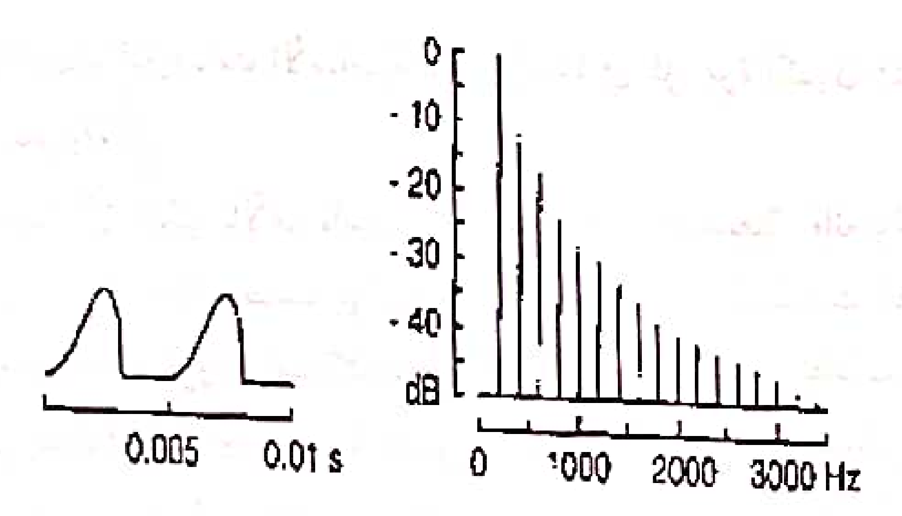
الصوائت في أواسط الكلمات heed, head, had, hod ,hawed, hood, who'd

حسب نطق مؤلف هذا الكتاب لها

المتضائلة بهذه الترددات الأساسية يتم توليدها في كل مرة يكـون هنـالك نبضـة من الأوتار الصوتية.

إذا أحببت أن تفكر بالأمر باستخدام مصطلحات موسيقية، فإنه يمكنك القـول بأن لكل صائت نغمة مميزة يتصف بها وحده دون غيره، وفقا للنبضات الصـادرة عـن الحنجرة، هذه النغمة تتكرر مرات كثيرة في الثانية الواحدة، تبعا للنبضات القادمة مـن الحنجرة. ليس هنالك ثمة جديد فيما يتعلق باستخدام هذه الطريقة للتأمل في أصوات الكلام. فيما مضى عام 1829 ذكر روبرت ولس (Robert Willis) أن "الصائت ما هو إلا تكرار سريع لنغمته الخاصة به"، وهذا إفراط في التبسيط، والسبب هو أن (ولـس) لم يدرك بأن الصوائت ليست مميزة بتردد واحد لكل منها إنما بمجموعة من الـترددات. أجرينا تعديلا بسيطا على ملاحظته وقلنا أن صائتا مـا هـو إلا مجـرد تكـرار سـريع لنغمته الفريدة الخاصة به فيكون لدينا نص يتلاءم مع المعلومات المعطاة في (الشـكل 7-5) بشكل رائع.

إن الوصف المستخدم في إنتاج صائت من الأصوات علـى النحـو الـذي سـرنا عليه له الأفضلية من ناحية كونه مباشرا، ولكنه ليـس مـرض تمامـا، لأنـه لم يـأخذ في الحسبان طبيعة نبضات الأوتـار الصوتيـة .لقـد تفحصنـا القنـاة الصوتيـة مـن ناحيـة احتوائها على حجم من الهواء المحدث للرنين، الـذي يدفـع إلى حالـة مـن الاهـتزاز بواسطة نقرات حادة من الحبال الصوتية. وفي الواقع، النبضات المحدثة بواسطة الحبـال الصوتية ليست نقرات حادة تماما. إنها تنَوعات في ضغط الهـواء تـأخذ شـكل موجـة كما في الشكل 7-6.



شكل 7-6 الشكل الموجي والطيف لنبضة مزمارية بتردد قيمته 200 هرتز

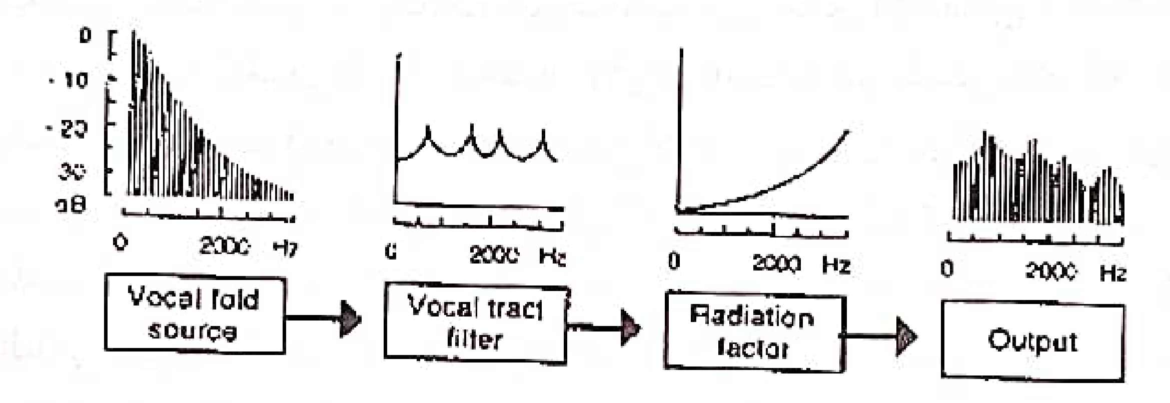
الرسم الطيفي لشكل الموجة نراه على يمين الشكل. الموجة التي على اليسار لها تكرارين خلال 100/1 من الثانية، لأن الأوتار الصوتية كانت تتذبذب بمعدّل(200 هيرتز. وبالنتيجة فكل التوافقات في الرسم الطيفي يمينا، عبارة عن مضاعفات الرقم(200) هيرتز. سنتخذ التردد الأساسي - المكوّن ذي التردد (200) هيرتز كقيمة مرجعية، ونعطيه عشوائيا قيمة OdB. إنّ سعات التوافقات الأخرى تتناقص بسرّعة جدّا كلما ازداد التردد. التوافق ذي التردد(400 هرتز) له سعة أصغر بـ(12 dB) من سعة التوافق ذي التردد 200 هرتز، و التوافق ذي التردد 800 هيرتز سعته أصغر ب 12 dB من سعة المكون 400 هيرتز.

في الحقيقة إن السعة تنخفض بمقدار 12 dB، لكل مضاعفة للتردد ـ التوافق 2000 هيرتز تقل سعته عن التوافق 1,000 هيرتز ب 12 dB. لقد رأينا في الفصل الثاني،أن أي مضاعفة في التردد هي زيادة أوكتاف (octatve): درجة الصوت المعيارية A في آلة البيانو هي 440 هيرتز، A فوقها 880 هيرتز، و A فوقها هي 1,760 هيرتز. نستطيع القول بأن الرسم الطيفي للنبضة المزماريّة له انحدار قيمته 12 dB لكل أكتاف . الانحدار رقم سلبي لأن السعة تنخفض بمقدار 12 dB لكل أوكتاف يرتفع فيها التردد.

هذه الاعتبارات تقودنا إلى طريقة أخرى معروفة في وصف إنتاج أصوات الصوائت، باستخدام مصطلح ما يسمى بنظرية مرشح المصدر (source-filter

theory). تعتبر هذه النظرية الأوتار الصوتية المهتزة مصـدرا لموجة تتأثر بإجبارها على المرور خلال مرشّح مشـكل بواسطة تجاويف رنينية تشكل بحد ذاتها القناة الصوتية. عوضا عن النظر للقناة الصوتية من ناحية احتوائها على حجم متذبذب من الهواء يحفّز بواسطة ضربات نبضات من الأوتـار الصوتيـة، سـنتأملها كمرشـح يمرر بعض الترددات الأفضل من غيرها. وبالطبع فإن الترددات التي ستسمح بمرورها هـي تماما تلك الترددات التي ستبدأ هي نفسها بالتجاوب معها. بالتالي فالمنحنى الذي يظهر تجاوبات القناة الصوتية هو أيضا المنحنـى الـذي يظـهر إلى أي مـدى سيسـمح بمـرور ترددات توضع فيه.

الشكل 7-7 يبين مقطعا لمرشح المصدر لإنتاج صائت. الرسم الطيفـي للنبضـة المزمارية نراه على يسار الشكل. في هذه الحالة افترضنا أن الأوتار الصوتية تهتز بـتردد 100 هرتز، وهكذا فان التوافقات تهتزعلى فترات 100 هرتز تبعا لذلك.



شكل 7-7 مقطع لمرشح خلال النطق بصائت

على يمين الرسم الطيفي مجموعة من المنحنيات تحدد اسـتجابة القنـاة الصوتيـة. يمكن اعتبار مخرجات القناة الصوتية كمدخـلات لصنـدوق آخـر مُوسـوم ب "عـامل الإشعاع" radiation factor، الذي يجب أن نأخذه بعين الاعتبار. فيما مضى كنا نأخذ بعين الاعتبار الهواء المهتز داخل القناة الصوتية. لكن هذه الاهـتزازات تحـدث داخـل الفم وهي ليست نفسها التنوعات التي نسمعها في ضغط الهواء. يـهتز الهـواء في القنـاة الصوتية بصورة تجعل جزئيات الهواء عند النهاية المفتوحة بين الشفتين تتحـرك للأمـام وللخلف. هذه الحركات هي التي تسبب اهتزاز الهواء في الخارج.

يعمل الهواء الذي بين الشفتين كمكبس، مصدر للصوت ينتج تنوعات في ضغط الهواء التي تنطلق خارج الشفتين انطلاق الشعاع، تماما كما تنطلق تنوعات في ضغط الهواء يحدث من مصدر محدث للصوت كالشوكة الرنانة. إن حركات مكبس الهواء هذا أكثر فعالية من غيرها في إحداث تنوعات في الضغط في الهواء المحيط عند بعض الترددات. كلما كان التردد أعلى، ازدادت استجابة / ردة فعل الهواء المحيط لفعل اهتزاز الهواء في القناة الصوتية. وهذه النتيجة التي اصطلحنا عليها العامل **الإشعاعي** " radiation factor " (ويستعمل مصطلح **المقاومة الإشعاعية** " radiation impedance " في كتب أكثر تقنية) بالإمكان اعتبارها نوعا من المرشحات التي تعزز الترددات الأعلى بحوالي 6 dB في كل أوكتاف. المنحنى الذي يمثل العامل الإشعاعي radiation factor تراه فوق المستطيل الثالث في الشكل 7-7.

المخرجات التي تُنتج عند الشفاه تعتمد على مصدر الأوتار الصوتية، وفعل الترشيح للقناة الصوتية، وكذلك تغيرات ناتجة عن العامل الإشعاعي (the radiation factor). من الطبيعي أن يكون مصدر الأوتار الصوتية هو المصدر ذاته لكل صائت، باستثناء التنوعات في درجة الصوت، يمكن أن تتذبذب الأوتار الصوتية بتردد 100 هيرتز، أو 200 هيرتز كما في الأمثلة التي كنا بصددها، أو أي تردد آخر يقع ضمن المدى الخاص بصوت الإنسان، ولكن بغض النظر عن التردد الأساسي، فإن الانحدار الطيفي للنبضة الصادرة عن الأوتار ستكون عادة حوالي 12 dB في كل أوكتاف. وإن فعل الترشيح الذي تقوم به الأوتار الصوتية سيختلف مع اختلاف كل وضع تتخذه الأعضاء الصوتية. بالتالي ستنتج مكوّنات (formants) بترددات مختلفة (قمم في منحنى الرنين).

الرسم الطيفي لشكل الموجة ما وراء الشفتين المشاهد على يمين الشكل 7-7 ستكون له قمم في مناطق تعتمد على خصائص المرشح في القناة الصوتية. الانحدار العام لمخرجات الرسم الطيفي سيتأثر بانحدار الرسم الطيفي للنبضة المزماريه بمقدار (12 dB- لكل أوكتاف) وكذلك بانحدار Radiation factor بمقدار (6+ dB لكل أوكتاف). فإن هذين العاملين معا يقدمان التفسير لانحدار مخرجات الرسم الطيفي

يعمل الهواء الذي بين الشفتين كمكبس، مصدر للصوت ينتج تنوعات في ضغط الهواء التي تنطلق خارج الشفتين انطلاق الشعاع، تماما كما تنطلق تنوعات في ضغط الهواء يحدث من مصدر محدث للصوت كالشوكة الرنانة. إنّ حركات مكبس الهواء هذا أكثر فعالية من غيرها في إحداث تنوعات في الضغط في الهواء المحيط عند بعض الترددات. كلما كان التردد أعلى، ازدادت استجابة / ردة فعل الهواء المحيط لفعل اهتزاز الهواء في القناة الصوتية. وهذه النتيجة التي اصطلحنا عليها العامل الإشعاعي ' radiation factor ' (ويستعمل مصطلح المقاومة الإشعاعية ' radiation impedance ' في كتب أكثر تقنية) بالإمكان اعتبارها نوعا من المرشّحات التي تعزز الترددات الأعلى بحوالي 6 dB في كل أوكتاف، المنحنى الذي يمثل العامل الإشعاعي radiation factor نراه فوق المستطيل الثالث في الشكل 7-7.

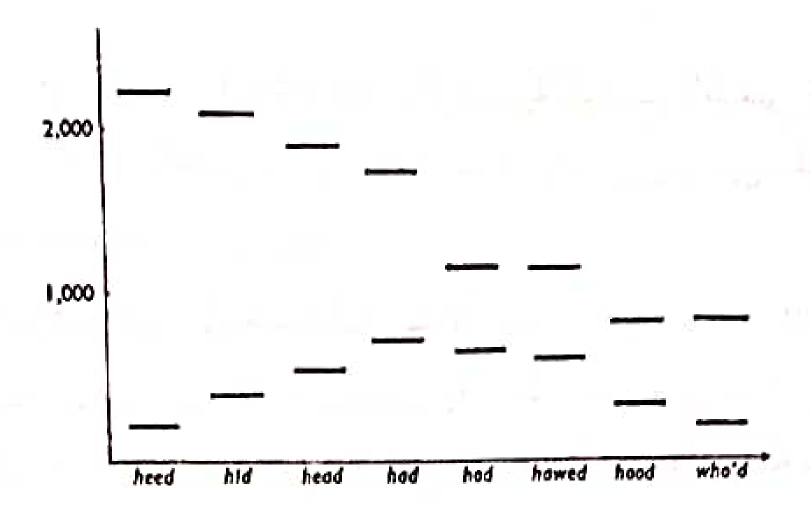
المخرجات التي تُنتج عند الشفاه تعتمد على مصدر الأوتار الصوتية، وفعل الترشيح للقناة الصوتية، وكذلك تغيرات ناتجة عن العامل الإشعاعي (the radiation factor). من الطبيعي أن يكون مصدر الأوتار الصوتية هو المصدر ذاته لكل صائت، باستثناء التنوعات في درجة الصوت، يمكن أن تتذبذب الأوتار الصوتية بتردد 100 هيرتز، أو 200 هيرتز كما في الأمثلة التي كنا بصددها، أو أي تردد آخر يقع ضمن المدى الخاص بصوت الإنسان، ولكن بغض النظر عن التردد الأساسي، فإن الانحدار الطيفي للنبضة الصادرة عن الأوتار ستكون عادة حوالي 12 dB في كل أوكتاف. وإنّ فعل الترشيح الذي تقوم به الأوتار الصوتية سيختلف مع اختلاف كل وضع تتخذه الأعضاء الصوتية. بالتالي ستنتج مكوّنات (formants) بترددات مختلفة (قمم في منحنى الرنين).

الرسم الطيفي لشكل الموجة ما وراء الشفتين المشاهد على يمين الشكل 7-7ستكون له قمم في مناطق تعتمد على خصائص المرشّح في القناة الصوتية. الانحدار العام لمخرجات الرسم الطيفي سيتأثر بانحدار الرسم الطيفي للنبضة المزماريه بمقدار (12 dB- لكل أوكتاف) وكذلك بانحدار Radiation factor بمقدار (6+ dB لكل أوكتاف). فإن هذين العاملين معا يقدمان التفسير لانحدار مخرجات الرسم الطيفي

بمقدار (6 dB- لكل أوكتاف). الخصائص الرئيسية للرسم الطيفي الناتج – قمم المكون- تتوافق مع هذا الانحدار العام. إنّها تعتمد بشكل رئيسي على الخصائص المرشحة في القناة الصوتية.

بما أنّ الصوائت مميزة إلى هذا الحد بترددات توافقياتها (formants)، فمن الملائم في الغالب، أن تمثل برسم بياني تظهر فيه فقط هذه المعلومة. وفي هذا الرسم البياني المبني على البيانات الظاهرة في الشكل 7-5، نستخدم المحور العمودي لتمثيل ترددات التوافقيات (formants) التي تميز الصوائت المختلفة، وينتج البعض رسوما بيانية مشابهة لها في التحليل الصوتي تسمى الصورة الطيفية (spectrogram) أو البصمة الصوتية، ويمثل المحور الأفقي الزمن الذي يحدث فيه صوت معين، أما المحور العامودي فيمثل الترددات المكونة الموجودة في الأزمنة المبينة على المحور الأفقي، وفيما يتعلق بالإضاءة أو العتام في الخطوط فهي تمثل سعات التوافقات المختلفة.

يعتبر الشكل 7-8 واحدا من الرسوم البيانية الأساسية في دراسة خصائص موجات أصوات الكلام. وبمقدورنا التحقق من بعض البيانات بدون استخدام أيّ آلات. على سبيل المثال، من الممكن دفع الهواء في القناة الصوتية للاهتزاز بحيث نتمكن من إحداث موجة متضائلة مطابقة لأخفض تردد وبسعة أكبر من سعات المكونات الأخرى. يمكن عمل هذا بنقرة بواسطة الإصبع تجاه الحلق، فوق الحنجرة، أثناء حبس النفس عن طريق لفظ الصوت المزماري المعروف بالهمزة (هذا الصوت عادة يحل محل الصوت [t] في كلمة (button)) . عندما تقوم بذلك تسمع نغمة جوفاء مملة، وهذا الصوت مؤلف من موجة متضائلة بتردد أساسي ينسجم مع المكوّن الأوّل.



شكل 7–8 رسم توضيحي للتوافقيات الأولى والثانية لبعض صوائت اللغة الإنجليزية حسب نطق مؤلف هذا الكتاب لها

إذا نظرت إلى الشكل 7–8 سترى أن المكوّن الأوّل first formant (أي القمة الأخفض في الرسم الطيفي) ذو تردد منخفض بالنسبة للكلمة heed (220 HZ)، وأعلى قليلا لكل من الكلمات hid (440 هيرتز) head (550 Hz) , had (750 Hz). إذا ما جعلت أعضاءك الصوتية في وضعية إنتاج الصوائت في كل واحدة من الكلمات ومن ثم تفرك حلقك بإصبعك أثناء النطق بالهمزة ، عندها ستحدث نغمة ذات درجة صوت منخفضة بالنسبة للكلمة heed وأعلى قليلا بالنسبة للكلمات (hid , head, had). وفي الكلمات المتبقية من هذه المجموعة فإن تردد التوافق الأوّل يتناقص، نتيجة لذلك، إنك عندما تكرر هذه الحيلة أثناء نطق الصوائت في الكلمات (hod , hawed , hood , and who'd)، ستحدث سلسلة من نغمات تتناقص في درجة الصوت. وربما تختلف الترددات الفعلية للنغمات التي تحدثها أنت عن تلك المستشهد بها فيما تقدم أعلاه، والتي هي قيم تقريبية مبنيّة وفقا لتحليل نطق المؤلف نفسه. ليس لمجرد أنك تمتلك لهجة مختلفة، بل لأنك تمتلك قناة صوتية أكبر أو أصغر من قناة مؤلف هذا الكتاب. هاتان السمتان كلتاهما ستؤثران على القيم المطلقة لتردد التوافقيات، ولكنهما قد لا تؤثران على الترتيب النسبي للأصوات التي تحدثها.

يمكننا أن نختبر تردد التوافق الثاني لكل من هذه الصوائت بواسطة همس الكلمات.عند الهمس تبقى الحبال الصوتية متباعدة قليلا، فيندفع الهواء القادم من الرئتين خلالهما، مسببا اختلافات صغيرة في الضغط تجعل الهواء في القناة الصوتية

يتذبذب. إن من بين الترددات الأساسية الأكثر وضوحا من حيث السماع تحت هذه الظروف تلك الخاصة بالتوافق الثاني، والتوافقات الأعلى. عندما تهمس مجموعة من الكلمات: (hid , head , hod, hawed, hood , who'd)

ستسمع انخفاضا تدريجيا في درجة الصوت الظاهرة، وكما ترى من خلال الشكل 7-7 وهذا الكلام مطابق للطريقة التي من خلالها يبدأ التوافق الثاني بالانخفاض تدريجيا لكل صائت في هذه السلسلة. ومن الجدير ملاحظته، على أي حال، بأن هذه طريقة عشوائية لفحص واحدة من الترددات الأساسية المرتبطة بصائت. عندما نهمس كل من الكلمات الأربعة الأولى في السلسلة hid، heed الخ ...، فإن درجة الصوت المهموس ربما تنسجم إلى حد ما مع تردد التوافق الثاني، لكن بالنسبة للكلمات الأربع الأخيرة، حيث يقترب التوافقيان من بعضهما قليلا، وتصبح سعة التوافق الأخفض أكبر نسبياً،فإن درجة الهمس قد تتلاءم بدرجة أكثر مع التوافق الأوّل مما هي عليه مع التوافق الثاني.

في الفصل التالي سنتناول بتفصيل اكثر البحث في العلاقة بين تردد التوافقيات وشكل القناة الصوتية، هنا سنلاحظ بعض الميول العامة التي نشاهدها من خلال مقارنة الرسوم البيانية للقناة الصوتية في الشكل 7-5 ، مع الصور الطيفية المطابقة لها، وبشكل عام، تعتمد الترددات التوافقية (formant frequencies) على عوامل ثلاثة :-

1) موضع أقصى نقطة لانقباض القناة الصوتية (وهذا الانقباض يتحكم بحركة اللسان للأمام وللخلف).

2)المساحة المقطعية المستعرضة لأقصى انقباض أو حجمه (و هذا الانقباض يتحكّم به اللّسان باتجاه سقف الفم وخلف الحلق أو بعيداً عنهما.

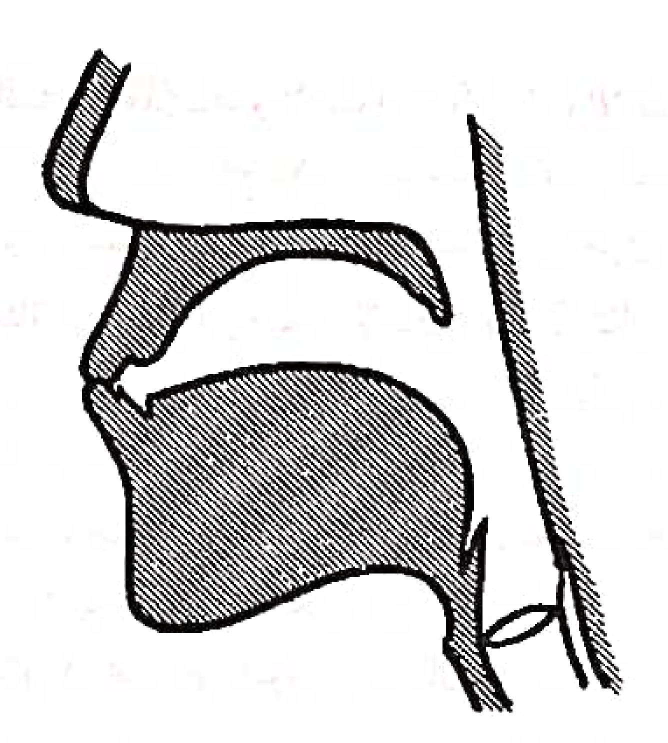
3)وضع الشفتين.

بالنسبة للصوائت كتلك التي في heed, hid, head, had، يرجع السبب الرئيسي في اختلاف التردد للتوافق الأول إلى الاختلاف في حجم أقصى انقباض في القناة الصوتية. يكون اللسان أقرب ما يكون من سقف الفم في الكلمة heed، أما بالنسبة للكلمات الأخرى فيكون اقل قربا. كقاعدة أوّلية، يمكننا القول بالنسبة

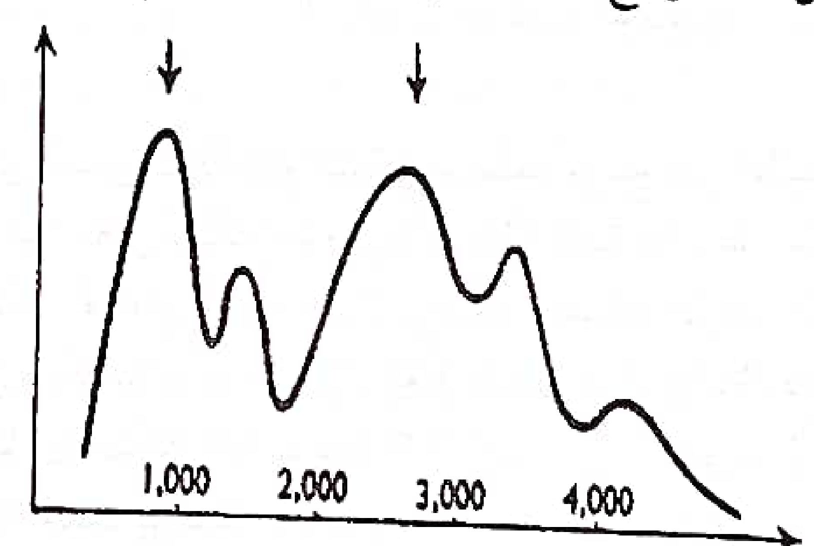
لصوائت من هذا النوع، كلما ازدادت المساحة المقطعية المستعرضة لأقصى انقباض للقناة الصوتية، ازداد تردد التوافق الأخفض. بالنسبة لصوائت من مثل تلك في hod , hawed, hood , who'd، الاختلاف في تردد التوافق الأوّل يخضع لتأثير موضع اقصى نقطة انقباض. في هذه الصوائت يكون الانقباض في البلعوم أو خلف الفم، وخلال هذه السلسلة يتحرك تدريجيا للأمام. عندما تتحرك أقصى نقطة للانقباض بعيدا عن المزمار، يزداد حجم الهواء فيما وراء الانقباض، ويقل تردد التوافق الأول.

اختلاف التردد في التوافق الثاني في الكلمات heed, hid, head, had يعتمد بشكل رئيسي أيضا على اختلاف حجم أقصى انقباض في القناة الصوتية. لكن القاعدة معكوسة بالنسبة لما ينطبق على التوافق الأول، كلما ازداد الانقباض يقل تردد التوافق الثاني. وترجع الاختلافات في تردد التوافق الثاني أيضا إلى استدارة الشفتين. على كل حال، هذه الحركة سوف تسبب بالإضافة إلى ذلك تناقصا في سعة القمة الثانية والقمم العليا. تزداد استدارة الشفتين بالتدريج في الكلمات (hid , head, had, heed, hod, hawed, hood, who'd). إن حركة الشفاه في الكلمات الأربع الأخيرة أكثر أهمية من حركة اللّسان والتي ينتج عنها خفض تردد قمة الرنين الثانية، لاحظ أنّ الزيادة في استدارة الشفة تفسر أيضا التناقص في السعة النسبية للقمم الثانية والثالثة في الكلمات الأربع الأخيرة من السلسلة.

إن الكثير من أصوات الكلام الأخرى تتشكل بطريقة مماثلة للصوائت التي كنا بصدد وصفها، على سبيل المثال، فالأصوات الأنفية، كتلك الأصوات في نهاية الكلمات (ram , ran , rang) والأصوات الجانبية كتلك الأصوات في بداية ونهاية (little, lull)، تعتمد على نبضات الأوتار الصوتية التي تسبب اهتزاز الهواء في القناة الصوتية. ولكل من هذه الأصوات توجد مواضع مميزة للأعضاء الصوتية، وبالتالي يمكن أن يرتبط بكل منها منحنى رنين خاص.



شكل 7-9 موضع أعضاء النطق خلال لفظ [m] في كلمة ram



شكل 7-10 منحنى رنين القناة الصوتية خلال النطق بالصوت الأخير من كلمة ram

خلال لفظ الصوت الأخير في كلمة (ram على سبيل المثال، تكون أعضاء النطق في المواضع كما في الشكل 7-9 الشفاه مغلقة، لكن ممر الهواء خلال الأنف مفتوح، هذا الشكل الخاص للقناة الصوتية له منحنى رنين كما يبدو في الشكل 7-10 إن أكبر الموجات المتضائلة الخاصة بهذه الموجة لها ترددات أساسية قرابة 220 هيرتز و2500 هيرتز. ويتميز كل صوت من الأصوات الأنفية بتوافق ذي تردد منخفض جداً.

في الصوائت الإنجليزية، والأصوات الأنفية، والأصوات الجانبية، المصدر الرئيسي للطاقة الصوتية هو إنتاج نبضات بواسطة الأوتار الصوتية. لكن تيار الهواء المنبعث من الرئتين يستخدم في تشكيل أصوات بطرق أخرى.

ومن الأمثلة الشائعة على صوت لا تكون فيه الأوتار الصوتية عاملة صوت يقع في بداية كلمة s ip، عندما نقول هذه الكلمة نبدأ برفع اللّسان بالقرب من الأسنان العليا الأمامية مشكلين ممرا ضيقا يندفع من خلاله الهواء المنبعث من الرئتين، دفقة الهواء المشكلة بواسطة هذا الأخدود في اللّسان تضرب أطراف الأسنان بسرعة عالية. كنتيجة لذلك يوجد هنالك الكثير من الاختلافات شبه العشوائية في ضغط الهواء، وهي تشكل في مجموعها صوتا بتردد عال،

(هسيس) المرتبط مع الصوت [s]. تحدث أنماط لاتكرارية من الموجات مشابهة لذلك عند لفظنا للأصوات غير المجهورة كما في الكلمات : [shin , thin , finish].

بعض أصوات الكلام تتشكل بواسطة مزيج من الآليتين اللتين كنا قد ناقشناهما فيما مضى وهكذا، فالصوت في بداية كلمة zoo على سبيل المثال، يحدث نتيجة لاهتزاز الهواء في القناة الصوتية بواسطة نبضات الأوتار الصوتية، وفي نفس الوقت عن طريق توليد تنوعات إضافية في ضغط الهواء بواسطة دفع الهواء خلال ممر ضيّق كما في إحداث الصّوت [S]، كما أن الأصوات في بداية الكلمات (vat, that) تحدث بواسطة استخدام هاتين الآليتين الصوتيتين.

هناك واحد من الأصوات الإنجليزية المهمة التي يجب أن نفرد لها بحثا خاصا الصوت [h]. في هذا الصوت لا تكون الأوتار الصوتية عاملة، كما تكون في حال نطق صائت، ولا يوجد هنالك طاقة صوتية، تولّد بواسطة دفع الهواء خلال ممر ضيق، بدلا من ذلك، الهواء القادم من الرئتين يتدفق من خلال ممر حر نسبيا خلال القناة الصوتية. لكن متى عبر تيار هوائي خلال التجاويف الصّوتية، ستحدث بعض التنوعات في ضغط الهواء بسبب السطوح غير المنتظمة التي تحجز تدفق الهواء، وهذه التنوعات كافية لإحداث اهتزازات خفيفة في الهواء الموجود في القناة الصّوتية. ولما

كانت مواضع أعضاء النطق أثناء الصوت [h] مشابهة للأصوات المحيطة، كالصوائث المجاورة، فإن عناصر التردد في الصوت [h] لها سعات نسـبية مشـابهة لسـعات تلـك الصوائت، غير أن الموجة المركبة لها سعة أقل ولا يوجد تردد أساسـي، حيـث أنـها لا تولّد بواسطة نبضات منتظمة من الأوتار الصوتية.

حتـى الآن لم نناقش مجموعـة مهمـة مـن الأصـوات، كتلـك في بدايـة ونهايـة الكلمـات (pip, bib, tit, did, kick,gig) بالطبع، الصوامت في هـذه الكلمـات لا يجب أن نفهمها على أنها أصوات في ذاتها إنمـا / ولكـن كطـرق لبدايـة الصوائـت و الانتهاء منها. كل منها يتضمن تغيرا مفاجئا في شكل الموجة المرتبطة مع الصائت.

تتمـيز الصّوامـت في الكلمـات (pip, tit, kick) عـن تلـك في (bib, did, gig) بفعـل عمـل الأوتـار الصّوتيـة، تبـدأ الأوتـار الصّوتيـة في المجموعـة الأخيرة بتوليد نبضات مبكرة في نطق كل كلمة وتستمر في ذلك لمدة أطـول مـن المـدة التي تتطلبها المجموعة الأولى. و ضمن كل مجموعة نجد الكلمات تختلف عـن بعضـها البعض جزيئا باختلاف شكل القناة الصّوتية، وخلال النطق بالكلمةgig، على سـبيل المثال، لا يتخذ اللّسان مواضعا له كتلك المواضـع الـتي يتخذهـا خـلال انتقالـه لأداء أصوات الكلمة did (إذا أردت التأكد حاول قول الجملـة "did he get his gig ?" ستلاحظ أن طرف اللّسان لا يكون في أي وقت وراء الأسنان الأمامية السفلية كما في حال الكلمة الأولى، ولكن في الكلمة الأخيرة يرفع مؤخر اللّسان تجاه الحنك الرخـو بينما هو في الكلمة الأولى منبسط في الفم نسبيا).

هذه الاختلافـات في شـكل القنـاة الصوتيـة تؤثـر علـى الصوائـت في هـذه الكلمات،كما ينتج عن تغير شكل القناة الصوتية تغير في نوعية الأصوات المجاورة.

الفصل الثامن

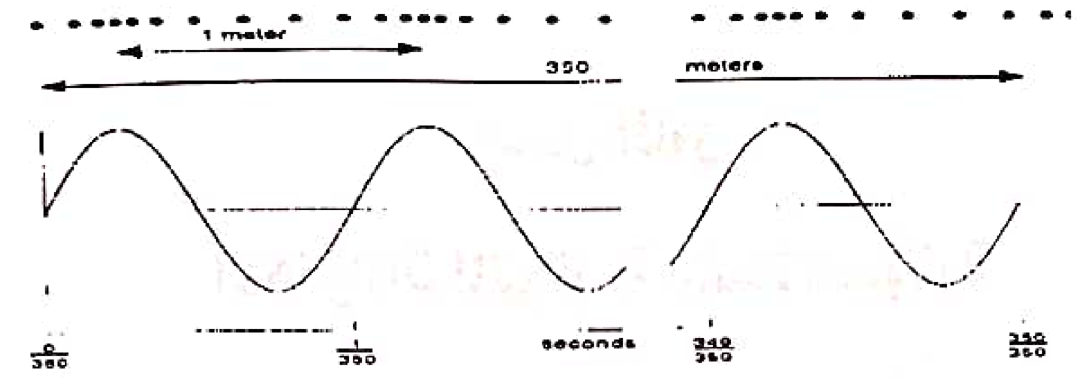
الاهتزازات المتجاوبة للقناة الصوتية

الفصل الثامن

الاهتزازات المتجاوبة للقناة الصوتية

وصفنا في الفصل السابق البنية الصوتية (الأكوستيكية) لبعض أصوات الكلام، و يتعين علينا الآن تفسير كيف تنشأ هذه الاهتزازات المتجاوبة للقنـوات الصوتيـة، و لكي نتمكن من ذلك، علينا أن نعيد دراسة كيف يهتز الهواء، حينما تحدث الأصوات. نحن نعلم أن كل جزيء مـن جزيئـات الهـواء يتحـرك إلى الأمـام و إلى الخلـف، نـاقلاً اهتزازاته إلى ذرات الهواء المجاورة له، و نعلم أيضاً بأن الصوت يستغرق وقتاً لانتقالـه. إذا رأيت بريق بندقية على مسافة ميل، فتمضي فترة زمنيّة من أربع أو خمس ثوان قبل أن تسـمع صـوت الانفجـار. ينتقـل الصـوت في الهـواء بسـرعة 350 مـتر في الثانيـة (و يعتمد ذلك إلى حد ما على درجـة الحـرارة و علـى كميـة الرطوبـة في الهـواء)، و الآن، تأمل مصدر صوت يهتز بتردد 350 هرتز، بعد ثانية واحدة، سـيبدأ الهـواء علـى بعد 350 متراً بالاهتزاز أيضاً بتلك السرعة(على افتراض أن مصدر الصوت عـالٍ بمـا فيه الكفاية)، و سنواجه وضعـاً كمـا في الشـكل 8-1. و لأن مصـدر الصـوت يـهتز بتردد 350 هرتز، سيكون هنالك 350 قمة ضغط تتباعد في مسافة 350 متراً. و بعبـارة اخرى، أن قمم الضغط تتباعد فيما بينها متراً واحداً.

إذا كان مصدر الصوت يهتز بتردد 700 هرتز، فسيكون هنـالك ضعـف العـدد من القمم موزعة على تلك المسافة التي ينتقل الصوت من خلالها في ثانيـة واحـدة، و عليه، فإن القمم ستكون بالضرورة أقرب إلى بعضها بعضاً، أي أن المسافة الفاصلة بين كلٍ منها تساوي 350/ 700 = 0.5 متر.



شكل 8-1 في الأعلى، صوت مثّلناه تبّعا لحركات ذرات الهواء الصادرة من مصدر للصوت يهتز بتردد 350 هرتز ويظهر الرسم البياني في أسفل الشكل تباعد قمم ضغط الهواء عن بعضها بمقدار متر واحد، طالما أن هنالك 350 قمة في 350 متر، وهي المسافة التي يقطعها الصوت في الثانية.

و تسمى المسافة بين قمم الضغط بطول الموجة للصوت. و كما ترى من الأمثلة الـتي تم بحثها في الفقرة السابقة، فإن طول الموجة يعتمد على التردد، فالبنسـبة لصـوت تـردده 350 هرتز، فإن طول موجته تبلغ مترا واحدا، و بالنسـبة لصـوت بـتردد أعلـى، يكـون الصـوت أقصر لأن عددا أكبر من الموجات تقع ضمن نفس المسافة. إذا اعتبرنا سـرعة الصـوت 350 متر في الثانية، فإننا نعبر عن هذه العلاقة على شكل معادلة كالتالي:

طول الموجة (ل) X التردد (ت) = السرعة (ع)

ولأغراض البحث فإنه من المفيد أن نعـبر عـن ذلـك بالسـنتيمترات بـدلاً مـن الأمتار، على النحو التالي:

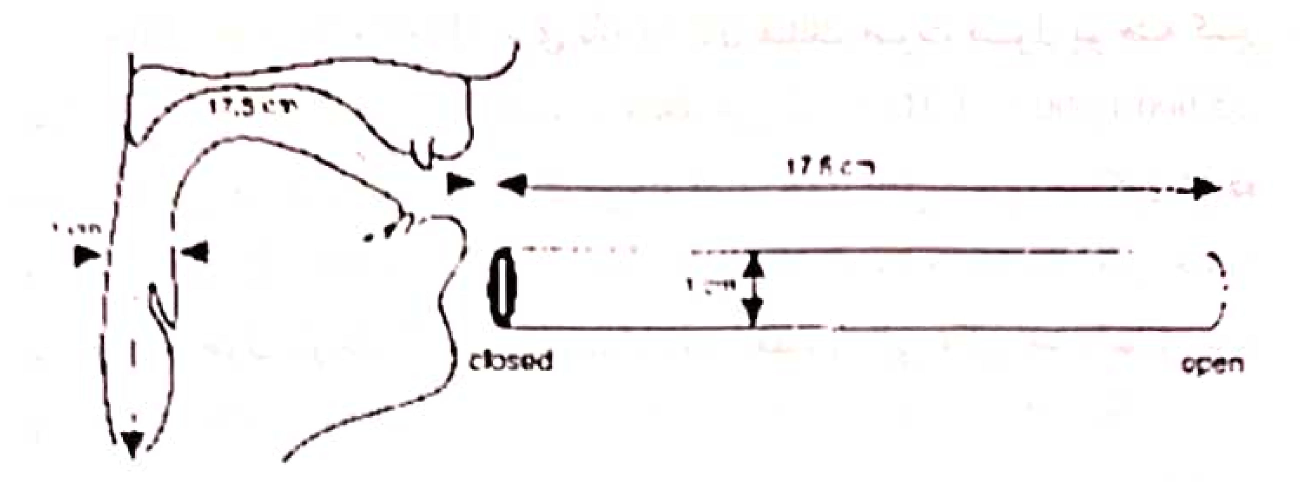
$$f \lambda = c = 35{,}000$$

حيث ترمـز f إلى الـتردد، λ (الرمـز اليونـاني lambda) يمثـل طـول الموجـة،ويمثـل الحرف c سرعة الصوت التي سنعتبرها، تسهيلا للأمـور مسـاوية ل 350٫000 سـنتمتر لكل ثانية. وإذا ما عرفنا (كما هو في الغالب) طول الموجة لصوت ما، وأردنا تحديـد تردده، نعيد ترتيب المعادلة كالتالي:

$$f = c/\lambda = 35{,}000/\lambda$$

وإذا ما طبقنا هذه المعادلة، نرى بأنه إذا كان هنالك صوت طـول موجتـه كبير جدا لنقل عشرة أمتار، فإن هذا الصـوت منخفـض الـتردد 35 Hz =35,000/1,000، وعلى العكس من ذلك، إذا كان طول موجته قصير جدا، لنقل 2 سم، فسيكون تردده عال جدا يصل إلى 17,500 Hz = 35,000/2 وكـلا الصوتـين يقتربـان مـن حـدود السّمع، لأن طول الموجة لكليهما يقارب الحدود القصوى التي يمكن استيعابها في بيئـة الإنسان الطبيعيّة.

والأن دعنا نتحول إلى إنتاج أصوات الكلام، وسنبدأ بدراسة حالة بسيطة لقنـاة صوتية محايدة تتخذ وضعا للتأهب بنطـق الصـائت (ə) في نهايـة الكلمـة Sofa. سنعتبر القناة الصوتية أنبوبا طوله حوالي 17ر50 سم (والواقع، يقل الطول عـن هـذا المقدار بالنسبة لغالبية الناس، إلاّ أن هذا الرقم مناسب، تسـهيلا للحسـاب) ويمكننـا اعتبار القناة الصوتية مغلقـة مـن أحـد طرفيـها بفعـل الأوتـار الصوتيـة المـهتزة، وأن الطرف الآخر مفتوح عند الشفتين (وحتى لو كانت الأوتـار الصوتيـة مـهتزة، إلا أن المسافة بينهما صغيرة، وعلى الرغم من هذا، فإنــه لا يـزال بإمكاننـا اعتبـار الأنبـوب مغلقـا)، خـلال النطـق بالصـائت (ə)، لا توجـد انقباضـات constrictions ذات أهميّة، وسنعتبر الأنبوب له قطـر ثـابت يسـاوي حـوالي سـنتمر واحـد، واعتبرنـا أن الأنبوب الظاهر على يسار الصورة أنبوبا معقدا في حين أن الأنبوب الظاهر على يمـين الصورة هو شكل مبسط له.



شكل 8-2 رسم توضيحي لقناة صوتية محايدة خلال النطق بالصائت [ə] (إلى الجهة اليسرى)، وصورة مُبسّطة لذلك الشكل كأنبوب مغلق من أحد أطرافه (إلى الجهة اليمنى).

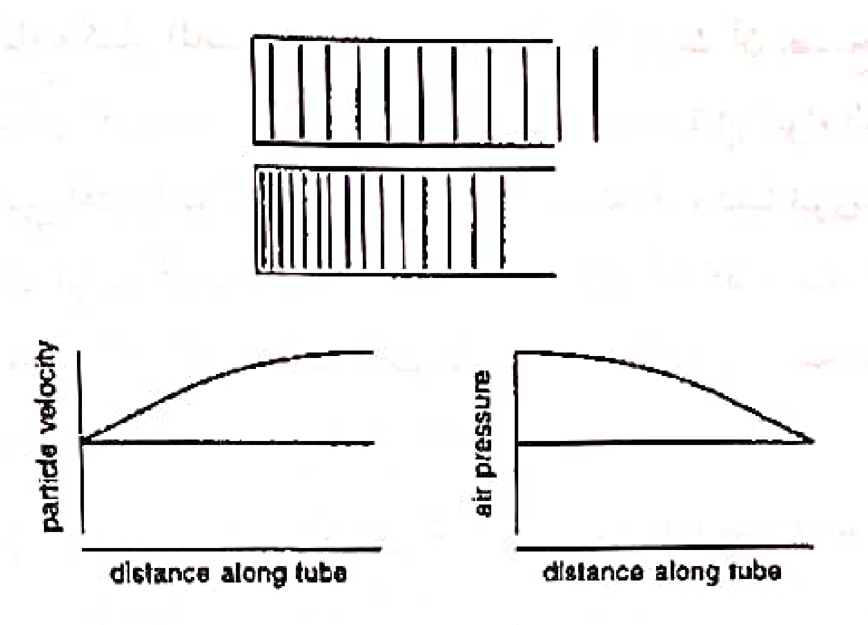
ويتعين علينا الآن أن نرى كيف يهتز الهواء في هذا الأنبوب استجابة للموجة المركبة التي يتم إنتاجها عند المدخل بفعل الأوتار الصوتية.

رأينا في الفصل السابق أن ترددات مكوّنات الموجة المركبة في المزمار تصل إلى 4٫000 هرتز على الأقل، وبعض ترددات هذه المكوّنات يشبه ترددات الاهتزازات الطبيعية لكمية الهواء الموجودة بداخل القناة الصوتية، وسيكون في مقدور هذه المكوّنات أن تعطي الهواء في القناة الصوتية دفعات صغيرة مضبوطة التوقيت بشكل مناسب، بحيث تنشأ اهتزازات كبيرة، مثلما تنشأ حركات كبيرة جرّاء دفعات صغيرة على أرجوحة.

إن إحداث حركات في الهواء بداخل القناة الصوتية شبيه أيضا بما يحدث عندما تنفخ في فوّهة قارورة، حيث يهتز تيار الهواء المتدفق بسرعة من على فوهة القارورة على نطاق واسع من الترددات، وبعض هذه الترددات شبيه بالترددات الطبيعيّة لاهتزاز الهواء في القارورة ويعود السبب في حركة الهواء في القارورة إلى هذه الترددات، بحيث أنه بعد مرور وقت صغير جدا، تنشأ حركات كبيرة نسبيا فيتحرك الهواء داخل القارورة وخارجها بشكل منتظم محدثا تأثيرا شبيه إلى حد كبير بالمكبس

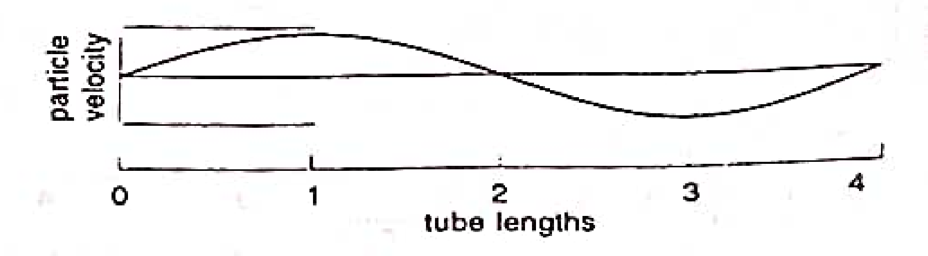
المتحرك أو بغشاء مكبّر للصوت، Loudspeaker، ولا يلبث أن يصبح هو نفسه مصدرا من مصادر الصّوت، وهكذا، فإن الاهتزازات الصغيرة في الهواء الذي يُنفَخ في عنق القارورة تبني اهتزازات أكبر حجما على ترددات معينة. وكما ترى من خلال النفخ في فوّهات قوارير مختلفة الشكل والأحجام، فإن التردد يعتمد على شكل وحجم كميّة الهواء الذي تحتويه القناة الصوتية، ومهمتنا الآن منوطة بتحديد الترددات التي يفضلها هواء القناة الصوتية من أجل الاهتزاز.

سنواصل دراستنا لأبسط شكل من أشكال القناة الصوتية، وهو عبارة عن أنبوب مغلق من أحد طرفيه، ويبلغ طوله 17ر5 سم. إذا ما أغلق أنبوب من أحد طرفيه، فإن ذرات الهواء عند ذلك الطرف لا تستطيع الحركة إلى الأمام أو إلى الخلف، ولكن عند الطرف الآخر المفتوح، فلن يحد من حركتها عائق، وتبلغ حركتها المدى الأقصى. أما سلوك الهواء في الأنبوب فشبيه بالزنبرك، يضغط مرّة ويمتد أخرى، فتبلغ حركة الهواء عند النهاية المفتوحة أقصى حد لها في حين أن حركة الهواء بالقرب من المزمار أقل ما يكون. ويوضح الشكل8-3 (بصورة مبالغ فيها) مشهدين للهواء، الأول في أعلى الشكل، حينما يكون الهواء متمددا إلى أقصى حد، والثاني في اسفل الشكل، حينما يكون مضغوطا إلى أقصى حد، ولكي تتولد هذه التمددات والتقلصات تتحرك ذرات الهواء بسرعة أو ببطء، ونستطيع أن نرسم رسما بيانيا لحركة الهواء لنبين عليه أقصى معدّل لسرعة تدفق ذرات الهواء في أجزاء مختلفة من الأنبوب، كما هو واضح في الجزء الأسفل من الشكل 8-3. ويبلغ اندفاع الهواء أقصاه عند النهاية المفتوحة، ويبلغ اندفاع الهواء أدنى حدّ له (في الواقع، صفرا) عند طرفه المغلق، وكنتيجة لحركات ذرات الهواء هذه تحدث تغيرات في ضغط الهواء بداخل الأنبوب، والضغط يبلغ أقصى حد له في الطرف المغلق، حيث تدفع الذرات بعضها بعضا، ويكون الضغط صفرا في الطرف الآخر المفتوح للهواء المحيط، كما هو مبين في الرسم باتجاه اليمين.



شكل 8-3 الهواء بداخل الأنبوب وهو يهتز كالوتر، في الأعلى، حينما يكون الوتر مشدودا أقصى ما يمكن، والرسم الذي يليه مباشرة يمثل وضع الوتر عندما يكون متقلصا إلى أقصى درجة ممكنة. وإلي اليمين في أسفل الشكل رسم لأقصى درجة في الضغط عند كل نقطة، ويسارا، رسم يمثل معدل سرعة الهواء في كل جزء من أجزاء الأنبوب.

إننا إذا اعتقدنا بأن التغيرات في ضغط الهواء هذه تشكل جزءا من موجة الصوت، يمكننا أن نتصور كيف يكون طول الموجة، ويوضح الشكل 8-4 سرعة ذرات الهواء، من الواضح أن التغيرات في ضغط الهواء تمتلك طول موجة تساوي أربعة أضعاف طول الأنبوب. إذا ما عرفنا طول الموجة، نستطيع أن نستخدم المعادلة التي ذكرناها سابقا لتحديد تردد اهتزاز هذا الزنبرك من الهواء. إذا اعتبرنا الأنبوب ممثلا للقناة الصوتية التي يبلغ طولها 17ر5 سم، فطول الموجة، إذن يساوي أربعة أضعاف 17ر5سم ، أو بعبارة أخرى = 70 سم. ونستنتج من ذلك بأن التردد الذي يهتز عليه الهواء $c/\lambda = 35/000/70 = 500$ Hz وعليه، يمكننا القول بأن موجة بتردد 500 هرتز توازي إحدى حالات الاهتزاز للهواء في القناة الصوتية حينما تكون في وضع محدد للنطق بالصائت (ə).

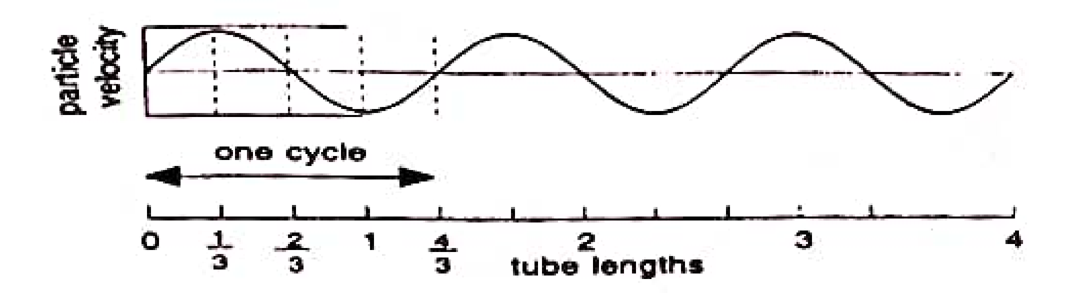


شكل 8-4 رسم بياني لسرعة الذرات في الشكل 8-3.

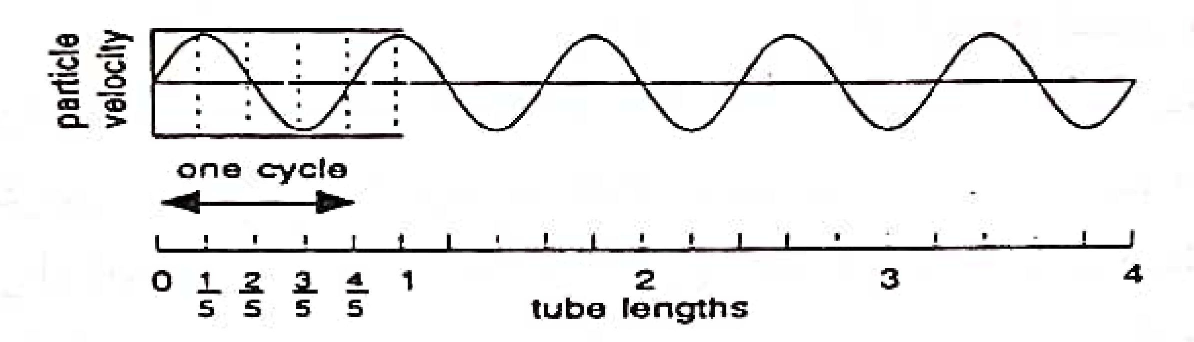
يوضح الشكل 8-3 إحدى الطرق التي يهتز من خلالها الهواء في أنبوب مغلق من أحد طرفيه ومفتوح من الطرف الآخر، وليست هذه الطريقة هي الوحيدة التي يهتز من خلالها الهواء في الأنبوب. إن الشرط الوحيد على حركة ذرات الهواء تلك هي أن تكون حرة الحركة بالسّرعة القصوى في الطرف المفتوح، وألاّ يكون هناك أية حركة في الطرف المغلق. وقد يكون هنالك تنوعات في الضغط أكثر تعقيدا في وسط الأنبوب. وموجة أخرى تتمشى مع الشروط الجارية على طرفي الأنبوب إلا أن لها تنوعات في أماكن أخرى موضحة في الشكل 8-5 حيث يشهد الأنبوب حركة قصوى في نقاط بداخل الأنبوب بالإضافة إلى الحركات في الجهة المفتوحة منه، كما أن هنالك حدّا أدنى للحركة في أماكن أخرى في الأنبوب غير تلك التي في طرفه المغلق. وكما ترى إذا اعتبرنا الدورة موجة بأكملها، فإن جزءا منها يتم بداخل الأنبوب، والجزء الآخر خارجه.

إذا قسمنا الأنبوب إلى أثلاث، كما هو مبين في الخطوط المتقطعة، فيبدو وكأننا بحاجة إلى ثلث آخر لاستكمال دورة كاملة لهذه الموجة، وبعبارة أخرى، فإن طول الموجة يساوي أربعة أثلاث طول الأنبوب. وإن قلنا بأن طول الأنبوب يساوي L، فإن طول الموجة يساوي أربعة أضعاف L/3 وعليه فإن المعادلة لتردد هذه الموجة كالتالي :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{35.000}{4L/3} = \frac{35.000 * 3}{4 * L} = \frac{35.000 * 3}{70} = 500 * 3 = 1.500 Hz$$



شكل 8-5 التنوعات في تدفق الهواء بحيث أن ¾ الموجة داخل الأنبوب



شكل 8-6 التنوعات في تدفق الهواء بحيث أن دوره مضاف إليها رُبع دورة، ليصبح المجموع 4/5 دورة داخل الأنبوب.

هناك المزيد من الموجات تتوالف جيدا ضمن الطرف المفتوح للأنبوب، وتظهر إحداها في الشكل 8-6. وفي هذه الحالة نشاهد أكثر من دورة كاملة. بداخل الأنبوب، ولو قسمت الأنبوب إلى أخماس كما هو موضح بالخطوط المتقطعة، تجد أنك تحتاج إلى أربعة أخماس فقط لدورة كاملة ولهذه الموجة طولا موجيا يساوي أربعة أضعاف L/5 حيث ترمز L إلى طول الأنبوب، وعليه فإن ترددها كالتالي :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{35.000}{4L/5} = \frac{35.000 * 5}{4 * 17.5} = \frac{35.000 * 5}{70} = 500 * 5 = 2.500 Hz$$

شاهدنا الآن أن قناة صوتية محايدة سيكون لها رنين واحد على 500 هرتز، وآخر على 1500 هرتز وثالث على 2500 هرتز وهذه تقريبا ترددات التوافقيات للحركة (ə) في نهاية الكلمة Sofa.

ويطابق التوافق الأول أدنى رنين يكون فيه ربـع الموجـة بداخـل الأنبـوب، بحيث أن طول الموجة يعادل أربعة أضعاف طول القناة الصوتية ويليـه التوافـق الثـاني في الدرجة الأقل رنينا

حيث يكون فيه ثلاثة أرباع الموجة بداخل الأنبوب، والتوافق الثالث هو الرنـين التالي الذي يكون فيه خمس أرباع الموجة داخل القناة.

يهتز الهواء في القناة الصوتية من خلال هذه الطـرق جميعـا اسـتجابة إلى الموجـة المركبـة الـتي تحـدث في المزمـار، ونسـتطيع كتابـة معادلـة عامـة للـترددات الممكنـة للاهتزازات في قناة صوتية محايدة مغلقة من أحد طرفيها ومفتوحة من الطرف الآخـر، كالتالي :

$$f = \frac{c*(2n-1)}{4L}$$

حيث تدل n على أي عدد صحيح، وتدل L على طول القناة الصوتية، وإذا كانت n =1

إذن 1 = (1- 2n) وعليه نكتب

$$f = \frac{c*1}{4L} = 500Hz$$

ويسمى هذا رنين موجة الربع للقناة الصوتية وبنفس الطريقة احتسبنا حـالات فيها

n=2 و (2n-1)=3 :

$$f = \frac{c*3}{4L} = 1.500Hz$$

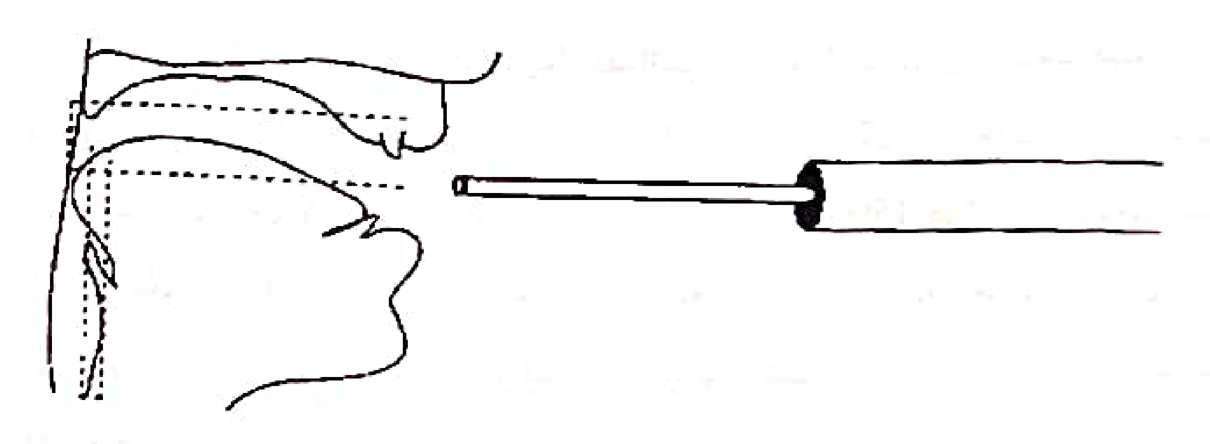
وهذه تسمى رنين موجة الثلاثة أرباع،و n=3 و عندها 5 = (2n-1)

$$f = \frac{c*5}{4L} = 2.500Hz$$

وتسمى رنين موجة الأربع أخماس. وطبقا لهذه الأفكار، نرى بـأن قناة صوتية محايدة طولها 17٫5 سم لها رنين علـى 500، 1500، 3500 و 4500 هرتـز، وهكـذا إلى مالا نهاية.

ومن الناحية العملية، نستطيع أن نهمل تجاوبات الرنين فـوق 4500 هرتـز، لأن اتساع الموجات صغير جدا فيها (تذكر أننا رأينا في الفصل السابق كيف أن الـترددات الموجودة في أصوات مجهورة تتناقص بمقدار 6 dB لكـل أوكتـاف، ولكننـا إذا طرحنـا سؤالا حول الترددات التي يهتز عليها الهواء في قناة صوتية (مبسطة) محـايدة، إذا مـا توفر المدخل المناسب، فسيكون الجواب أن هناك اهـتزازات متجاوبـة (resonances) لكل 1000 هرتز ابتداء من 500 هرتز ثم يزداد بالتدريج إلى مالا نهاية.

ويمكننـا أن نطبـق نفـس الاعتبـارات لاحتسـاب الاهـتزازات المتجاوبـة (resonances) التي تحدث في أشكال أخرى للقناة الصوتية، فالصائت (a) كمـا هـو في كلمة father يكون تجويف الفم عند النطق به مفتوحا نسـبيا، ويكـون اللسـان في وضع منخفض، ويتراجع إلى الخلف باتجاه البلعوم، ولسهولة الإيضـاح، نعتـبر القنـاة الصوتية مؤلفة من أنبوبين الأنبوب الضيق يمثل البلعـوم والأنبـوب الأكـبر إلى الأمـام ويمثل تجويف الفم، كما هو موضح في الشكل8-7.

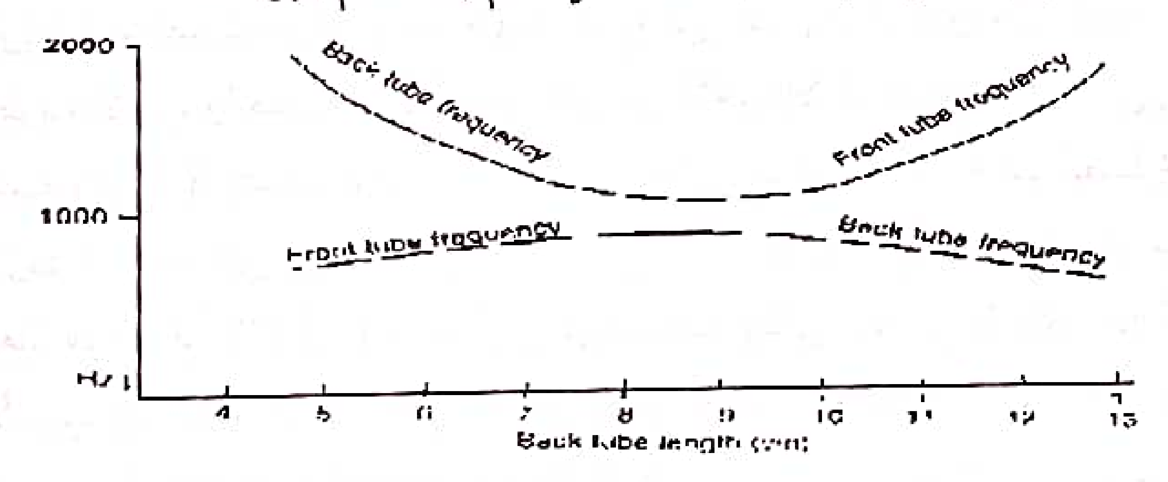


شكل 8-7 شكل القناة الصوتية عند النطق بالصائت [a:] في كلمة father مثل لها في الرسم بأنبوبين اثنين

إن أنبوب البلعوم مغلق عند المزمـار، ومفتـوح إلى حـد مـا عنـد نقطـة التقائـه بالأنبوب الذي يمثل تجويف الفم، أنبوب الفم مفتوح عند الشفتين، وبالمقارنة مع هـذا الانفتاح الكبير، نستطيع أن نعتبره مغلق في نهاية البلعوم، ولهذا، فإننا نجد أنفسنا أمـام وضع يتوفر فيه لدينا أنبوبان متساويا الطول تقريبا، وكل واحد منهما يسـاوي نصـف طول القناة الصوتية، وكل واحد منهما مفتوح من إحدى طرفيـه ومغلـق تقريبـا مـن الطرف الآخر، وأحد الأنابيب أوسع بكثير من الآخر، إلا أن هـذا الأمـر ليس بـذي أهمية بالنسبة لاحتساب تردد الرنين، من حيث أن طـول الموجـة (وهـو أيضـا يحـدد التردد) يعتمد على طول الأنبوب في أنموذج القناة الصوتية التي نحن بصدد دراستها. وهذا هو الواقع طالما أن الأنبوب ليس عريضاجداً. ولكي نعتبر موجة تنتقل من أعلى الأنبوب إلى أسفله، فإن العرض يجب أن يكون أقل من ربع الطول وهذا هـو الوضـع الطبيعـي في قنـاة صوتيـة اعتياديـة (وإن كـان الأمـر ليـس كذلـــك في الرســومات التوضيحية التي قدمناها، حيث بالغنا في موضوع "العرض" كي نتمكن من رؤية الموجة بشكل أوضح)، كمـا سـبق وأن شـاهدنا، فـإن طـول القنـاة الصوتيـة = 5ر17 سـم ويتفاوت قطرها أثناء النطق بالصوائت من بضع مليمترات إلى أن تصل إلى حد أقصاه 5ر3 سم تقريبا.

ولما كان كل أنبوب في أنموذجنا للصائت [a:] يساوي نصف طول القناة الصوتية، فإن ترددات الاهتزازات المتجاوبة (الرنين) ستكون ضعف الترددات للقناة الصوتية ككل. فبدلا من أن تكون هناك 500 هرتز و 1500 هرتز ... الخ، سيكون هنالك نظريا، 1000 هرتز، 3000 هرتز ... الخ، ومن الناحية العملية، فإن أنبوب الفم غير مغلق تماما من إحدى طرفيه، وسيكون هناك تفاعل بين حركات ذرات الهواء في هذا الأنبوب وذرات الهواء في أنبوب البلعوم، والنتيجة النهائية لهذا التفاعل هي أن تردد الرنين للبلعوم سيكون أقل بقليل، في حين أن تردد الرنين للفم سيكون أعلى. إن قيمة التردد الأقل ستكون 900 هرتز بينما قيمة التردد الأعلى ستكون حوالي 1100 هرتز وهي قيم قريبة من الترددات التي تميز توافقيات الصائت .[a]

إذا اعتبرنا القناة الصوتية وكأنها تتكون من ِأنبوبين، نرى بأن أحدهما يتناقص طولا والآخر يزداد طولا تبعا لحركة اللسان في الفم إلى الأمام وإلى الخلف.



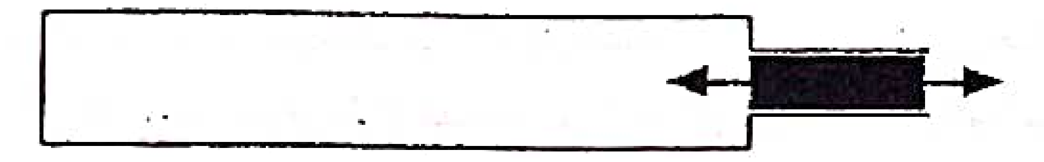
شكل 8-8 الاهتزازات المتجاوبة لأنبوبين، أحدهما يمثل ذلك الجزء من القناة الصوتية خلف الفم والبلعوم، والأخرى تماثل ذلك الجزء من القناة الصوتية في مقدّمة الفم.

الشكل 8-8رسم بياني لترددات الأنبوبين، إذا افترضنا أن الطول الكلي للأنبوبين يساوي 5ر17 سم والنقطة الوسطى في هذا الرسم هي تقريبا مطابقة للصائت [a:].

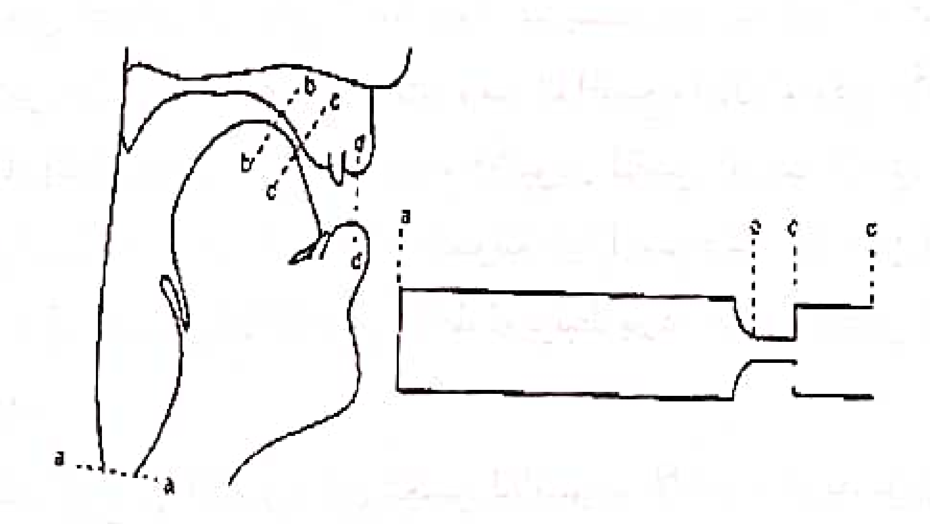
إن الأنبوب الأطول في الشكل 8-8 ينتج دائما الرنين الأقل ترددا، وهو ما يعادل التوافق الأول. وبازدياد طول الأنبوب يتناقص التردد، وأقصى حد يمكن للأنبوب أن يبلغه طولا، وهو طول القناة الصوتية، أي 5ر17 سم، وكما سبق أن ذكرنا في الفصل السابق فإن قيمة تردد الرنين الأول لأنبوب من هذا النوع هي 500 هرتز. ولكن سبق وأن ذكرنا في الفصل السابق أن تردد التوافق الأول قد يقّل عن هذه القيمة ففي الصائت [i:] في كلمة see قد يصل التردد إلى 250 هرتز، علينا الآن أن ندرس كيف تنشأ هذه الترددات، ومن الواضح، فإن أنموذج الأنبوبين لن يكون مناسبا. إننا نستطيع استعمال أنموذج الأنبوبين لتفسير السبب الذي يكون فيه تردد التوافق الأول لمتحدث طول قناته الصوتية 5ر17 سم دائماً أقل من 900 هرتز، ويعود السبب في ذلك إلى أن الأنبوب الأطول يرتبط بتردد الرنين الأقل قيمة، وفقا للتوافق الأول.

إن الحد البالغ في القصر الذي يمكن للأنبوب الأطول أن يصل إليه يعادل نصف طول القناة الصوتية ومثل هذا الأنبوب لا يحدث رنينا أعلى من 900-1000 هرتز وهو رنين نصف طول القناة الصوتية، إلاّ أن أنموذج الأنبوب لا يسهم في إعطاء تفسير يوضح كيف يتم إنتاج ترددات التوافقيات الدنيا. إن الحل لهذه المشكلة يكمن في أن نعتبر الهواء في القناة الصوتية و كأن جزءا منه محجوزٌ تماماً، وليس أنه محجوز في انبوب مفتوح من جهة واحدة. وفي بعض الأحيان، نجد أن ذلك الجزء من القناة الصوتية خلف انقباض اللسان - التجويف الخلفي يسلك سلوكاً مشابها للهواء المهتز في قارورة حينما تنفخ في فوتها.ويعرف هذا النوع من الأجهزة ب "مرنان هلمهولتز" Helmholtz resonator. إنه ترتيب لكمية صغيرة من الهواء كتلك التي توجد في عنق

القارورة، والتي تعمل عمل المكبس، فتهتز إلى الأمام والى الخلـف بفعـل كميـة الهـواء الموجود في الجزء الرئيسي من القارورة، كما هو ظاهر في الشكل 8-9 إن معدل سرعة الاهتزاز - التردد الناتج، يعتمد جزئياً على حجم الهــواء في الفـراغ، هـذا مـن ناحيـة ويعتمد جزئياً على كتلة الهواء بداخل عنق الزجاجة.



شكل 8-9 رنان هيلمهولتز على شكل زجاجة يَسْلك في عنقها الهواء ككتلة قادرة على الاهتزاز إلى الأمام وإلي الخلف على حجم الهواء المضغوط داخل الزجاجة.



شكل 8-10 شكل القناة الصوتية عند النطق بالصائت [i] في كلمة see وهو يشبه رنان هيلمهولتز حيث يمثل الهواء المحتوى في البلعوم (a-b) جسم الرنان، ويمثل عنق الزجاجة القناة بين اللسان وسقف الفم الصلب (a-c). وأقام رنان هيلمهولتز أنبوب قصير مفتوح من أحد طرفيه (a-d).

إن جزءا من أجزاء القناة الصوتية يسلك سلوكاً مشابها لمرنان هلمهولتز خـلال النطق بالصائت [i] في كلمة see. وللنطق بهذا الصائت، ترتفع مقدمة اللسان باتجاه سقف الفم الصلب (النطع) hard palate مكونا قنـاة ضيقـة تنـاظر عنـق الزجاجـة. توجد كمية كبيرة من الهواء خلف انقباض اللسان في الجزء الأخير من الفم والبلعـوم،

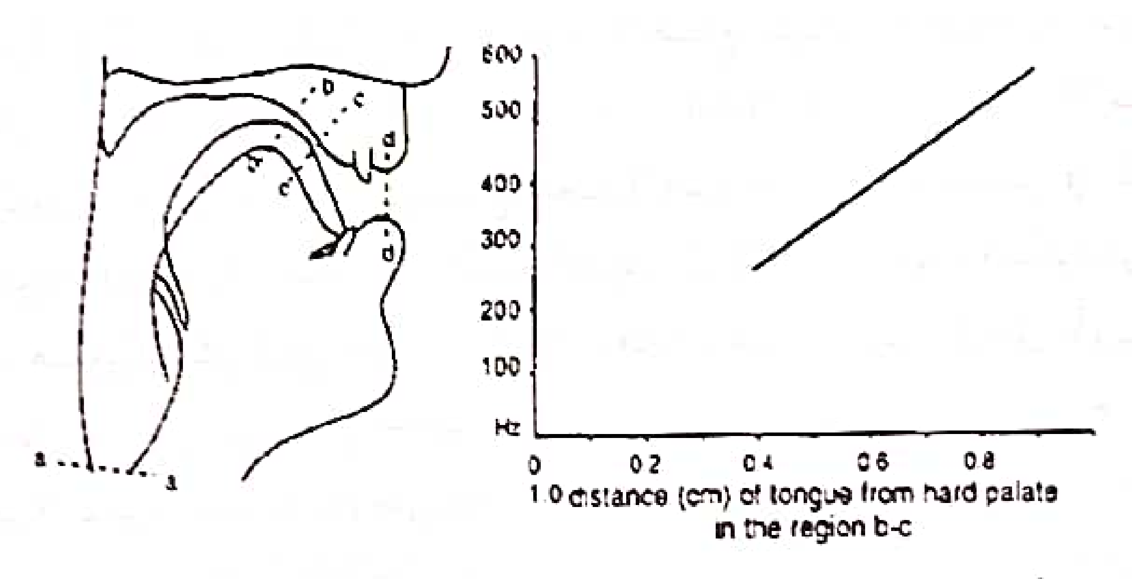
والتي تشكل جسم القارورة.، وفي المقدمة، يوجد أنبوب قصير مفتوح ذو تردد تجاوبي حدد بطوله على نحو ما ناقشناه سابقا. والشكل 8-8 رسم توضيحي لما يجري في هذه الحالة، وهذا بالطبع تبسيط كبير لشكل الموجة المركبة. يمكن حساب تردد رنين هلمهولتز إذا عرفنا حجم الهواء في الجسم (a - b) في الشكل، بالإضافة إلى مقطع عرضي وطول العنق (b – c) في الشكل. فإن كانت منطقة عنق الزجاجة A، و الطول L، وحجم الهواء في الجسم V، فالمعادلة لاحتساب التردد هي:π
حيث c = سرعة الصوت.

وتستعمل هذه المعادلة لحساب ترددات الرنين المطابقة لبعض أشكال الأوتار الصوتية. ويمكن اتخاذ الشكل 8-10 وسيلة لإيضاح انقباض constriction طوله سنتمتر واحد في منطقة سقف الفم الصلب hard palate (على مسافة 12 – 13 سم من المزمار). ويؤدي هذا إلى أن يصبح حجم التجويف خلف الانقباض في الفم والبلعوم 60 سم^3. إذا كانت منطقة المقطع العرضي للانقباض 15ملم2، فسيكون تردد مرنان هلمهولتز اكثر بقليل من 280 هرتز، وهذا الرقم مناسب للتوافق الأول في الصائت [i]. وإذا نقل نفس الحجم من الانقباض إلى الخلف في منطقة سقف الحلق الرخو (الطبق) soft palate، على مسافة 10 – 12 سم من المزمار، فسيقل حجم التجويف ليصبح 50 سم^3، ويصبح تردد المرنان 300 هرتز، وهذا الرقم يناسب الصائت [u:]

وهناك حالة أخرى مهمة للدراسة تتعلق بما يحدث حينما نغير حجم عنق المرنان، وهو ما يحدث حينما نغير حجم القناة بين اللسان وسقف الفم الصلب، وسنولي الاهتمام هنا للقطر D وهو قطر القناة بين اللسان وسقف الفم بدلا من تركيزنا على منطقة عنق المرنان A. وإذا افترضنا أن القناة بين الفم وسقفه الصلب دائرية، فإن المسافة بين اللسان وسقف الفم يمكن نسبتها إلى المنطقة A. عندما نلاحظ أن المحيط يساوي نصف القطر وعليه، $A=\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$ وما نريد عرفانه يتعلق بما يحدث

عندما يبتعد اللسان عن سقف الفم، وتصبح القناة أوسع ويبين الشكل 8-11 العلاقة بين التردد الناتج وبعد اللسان عن سقف الفم، على افتراض أن بقاء حجم الهواء خلف انقباض اللسان واحداً. وبالطبع، أثناء عملية الكلام، فإن هذا الحجم يتغير أيضاً، ولكن لكي تتعرف على سلوك مرنان هلمولتز، من الأسهل أن نبدأ بدراسة تأثير تغيير شيء واحد في كل مرة.

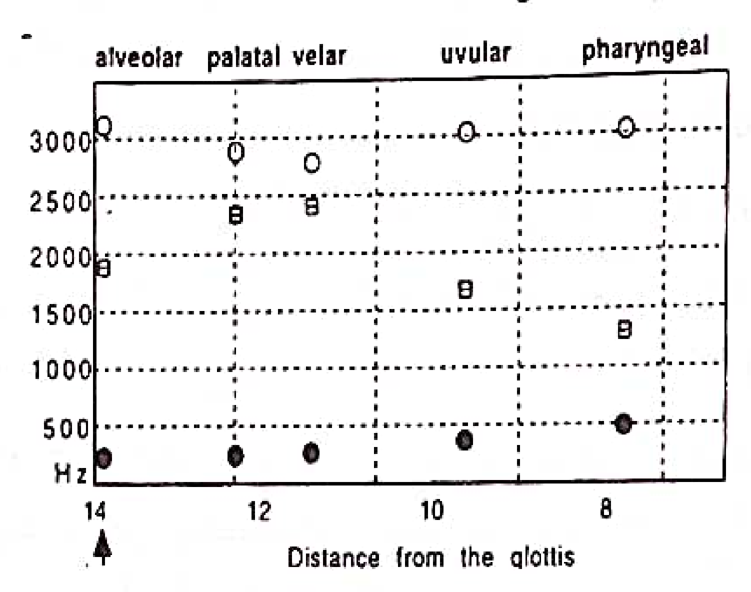
إن النقطة الواضحة على يسار الشكل8-11 هي لشكل يتناسب والصائت [i] ومن أجل هذه الحسابات، اعتبرنا أن طول الانقباض سنتمتر واحد، واعتبرنا حجم الهواء وراء الانقباض 60سم³.



شكل 8-11 تغيرات في تردد رنان هيلمهولتز حينما يتم تغيير مقطع عرضي للعنق فقط. تناظر النقطة إلى اليسار انقباض مناسب للصائت [i] (الخط السميك) والنقطة إلي اليمين تناظر الصائت [a].

وبهذه القياسات وبانقباض ضيق، فإن تردد هلمهولتز حوالي 270 هرتز. وعندما نزيد قطر القناة، وهو ما يحدث حينما تخفض اللسان لحركات اكثر انفتاحاً مثل الصائت [i] في كلمة bid، أو أكثر انفتاحاً لصوائت مثل [e] في كلمة bed، يزداد التردد. وكما لاحظنا فيما سبق، إن هذا الشكل غير مناسب لبيان ترددات التوافقيات لهذه الصوائت لأنه لم يتم الأخذ بالحسبان حجم الهواء في البلعوم. وعلاوة

على ذلك، فيما يأخذ اللسان بالابتعاد عن سقف الحلق الصلب، فلم يعد ممكنا اعتبار شكل القناة الصوتية مرناناً كمرنان هلمهولتز الذي يتطلب وجـود كميـة صغـيرة مـن الهواء في عنق المرنان، إلا أن هذا الشكل يعرض كيف يمكن أن نفسر القيـم المنخفضـة للصوائت العليا، وأن نقدم الأسباب التي تجعـل تـرددات التوافـق الأول ترتفـع شـيئاً فشيئاً كلما أصبحت الصوائت اكثر انفتاحاً.



شكل 8-12 ترددات التوافقيات الثلاثة الأولى عندما يحدث انقباض في القناة الصوتية على أبعاد مختلفة من المزمار. ويمثل الترددات الأولى F1 نقاط سوداء كبيرة، ويمثل الترددات الثانية نقاط مظللة، بينما يمثل التوافقيات الثالثة دوائر مفتوحة.

سنختتم هذا الفصل بالنظر إلى نتائج طريقـة اكـثر تعقيـداً لاحتسـاب تـرددات التجاوب resonances للقناة الصوتية كما طورها عالم الصوت السويدي جونار فانت Gunner Fant. يسـتند الشـكل8-12 إلى حسـاباته لـترددات التجـاوب (formants) الصادرة عن القناة الصوتية كسلسة من الأنابيب المترابطة المغلقة. وعلية، فإننا نستخدم أنموذجاً مطوراً يمثل القناة الصوتية كأنابيب مترابطـة كمـا في الشـكل 8-7، وأنموذجـا يعتبر القناة الصوتية (بصورة جزئية) كمرنان هلمهولتز كمـا هـو موضـح في الشـكل 8-10.

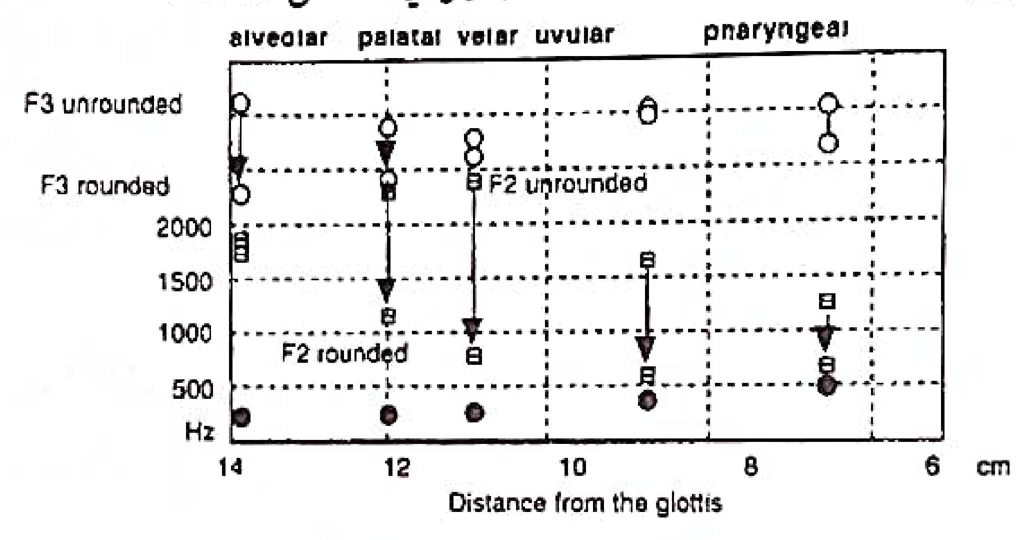
يمثل خط النقاط فوق السهم على يسار الشكل 8-12التوافقيات الناتجة عندما تحاكي سلسلة من الأنابيب انقباضاً في نقطة تبعد 14 سم تقريباً عن المزمار، وهذا الانقباض يقع في منطقة اللثة. وكما نشاهد، التوافق الأول منخفض جدا، والتوافق الثاني حولي 1800 هوتز، والتوافق الثالث يزيد عن 3000 هرتز. وفي أي وقت تتحرك فيه أعضاء النطق لعمل انقباض للقناة الصوتية في المنطقة اللثوية، وهو ما تفعله عندما تتحرك من نطق صائت باتجاه أحد السواكن التالية [t, d, n, l] تتحرك وتزداد ترددات الرنين لتصل قرب هذه القيم. أما إن كان الانقباض في الخلف، وبالتحديد في منطقة سقف الفم الصلبة hard palate نشير إلى ترددات المكونات بنقاط العمود الثاني. كما سبق وأن أشرنا سابقاً من أن هذه الترددات شبيهة بترددات الصائت [i] في الكلمة see. وانقباض آخر في الجزء الخلفي من الفم، بالتحديد في منطقة

(الطبق) سقف الحلق الرخو، يخلق وضعا يكون فيه التوافق الثاني والثالث قريبان من بعضهما البعض، وهذه علامة واحدة من عدة علامات الصوامت الطبقية، ففي الكلمة gag يبدو أن التوافقين الثاني والثالث يبدآن من مصدر واحد ثم يفترقان للصائت (a)، ثم يتحركان معا مرّة أخرى للساكن الأخير، وإن كان الانقباض في المنطقة اللهوية، فلا نجد التوافق الثاني والثالث قريبان من بعضهما، كما نجد زيادة ملحوظة في التوافق الأول، وأخيرا، إن كان الانقباض في البلعوم، كما هو الحال في إنتاج الصائت [a:] في كلمة fatherفإن التوافقين الأوليّن يشرعان في أن يكون لهما ترددات قريبة من بعضهما.

إن جميع الترددات التي تظهر في الشكل 8-12 قد تم احتسابها على افتراض أن القناة الصوتية لها وضع مفتوح للشفتين كما هو الحال خلال النطق بالصائت [a:] في كلمة father. ومما يثير الاهتمام أن نرى ماذا يحدث عندما نضيف استدارة الشفتين لكل شكل من أشكال القناة الصوتية، ونعيد احتساب ترددات التوافقيات على افتراض أن الشفتين في وضع مستدير للغاية، اي في وضع يزيد استدارة عما هو

خلال النطق بالصائت [u] في كلمة who، و(تظهر النتائج في الشكل8-13) وكما نشاهد فالانقباض الذي يحدث في مقدّمة القناة الصوتية فإن الأثر الرئيسي لاستدارة الشفتين هو تخفيض التوافق الثالث F3، ويكون التأثير أعظم بكثير على التوافق الثاني F2 عندما يكون الانقباض في المناطق النطعية palatal والطبقية velar واللهوية uvular، إن انقباضا في المنطقة الطبقية يصاحبه استدارة في الشفتين يطابق شكل القناة الصوتية عند النطق بالصائت [u] في كلمة who، أو شبه الصائت [w].

إن الترددات المميزة لهذا الوضع هي 300،800 و2600 هرتز، واستدارة الشفتين هنا لا تؤثر على التوافق الأول F1، كما يظهر في الشكل (8-13).

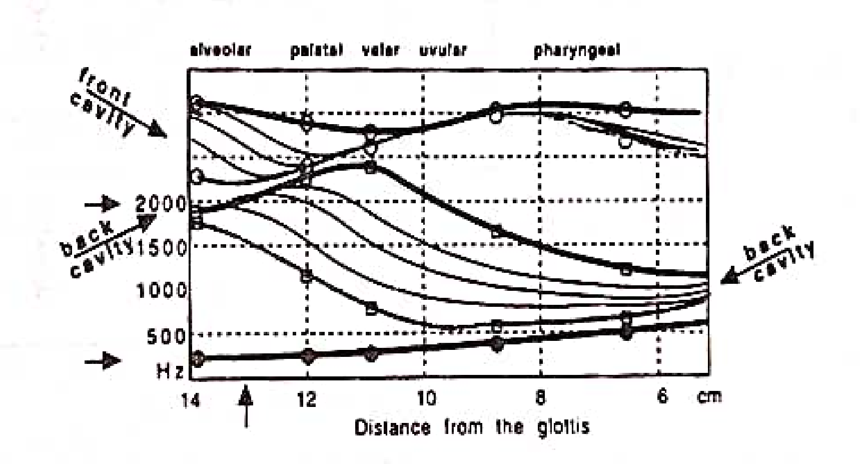


شكل 8-13 تأثير إضافة استدارة الشفتين لكل انقباض يحدث في القناة الصوتية التي تظهر تردداتها في الشكل 8-11. ولم تظهر التغيرات بالنسبة للترددات الصغيرة بسبب صغرها المتناهي.

والسؤال الذي يطرح نفسه : لماذا يكون لاستدارة الشفتين أكبر الأثر على التوافق الثالث F3

في بعض الأحيان وعلى التوافق الثاني F2 أحيانا أخرى ؟ والجواب على ذلك هو أن الشفتين تقعان على حدود التجويف الأمامي، ذلك الجزء من القناة الصوتية أمام الانقباض الذي أحدثه اللسان، وعليه فإن استدارة الشفتين تؤثر بالدرجة الأولى على

رنين التجويف، ونرى ذلك بوضوح إذا ما تأملنا أشكالا أكثر تفصيلا للأشكال 8-12 و 8-13، والمبينة في شكل 8-14حيث تظهر في هذا الشكل جميع النقاط في الشكل السابق، ولكن هذه المرة تم توصليها بالخطوط كي نتمكن من قراءة ترددات التوافقيات الناتجة عن الانقباضات وهي تبعد مسافات متوسطة عن المزمار. لو أردنا، على سبيل المثال، أن نعرف ترددات التوافقين الأولين عندما تكون الشفتان منفرجتين، وعندما يكون هنالك انقباض يبعد مسافة 13 سم عن المزمار (السّهم الذي يشير للأعلى أسفل الشكل)، نستطيع أن نحدد بأن تردداتها هي :250 هرتز و 2000 هرتز، ويبين الشكل8-14أيضا ثلاث درجات متوسطة لاستدارة الشفتين المشار إليها بخطوط باهتة بين الخطوط السميكة الواصلة بين النقاط المستديرة، والتي بحثناها سابقا



شكل 8- 14 ترددات التوافقيات الثلاثة الأولى الناتجة عن تغيير موقع الانقباض في القناة الصوتية وكذلك تغيير درجة استدارة الشفتين، ويمثل الخط الغليظ(الغامق) الانفراج الأكبر للشفتين، بينما يمثل الخط الرفيع الحدّ الأعلى لاستدارة الشفتين، ويرتبط السّهم الكبير في الجهة اليسرى بالترددات المرتبطة بالتجويف الخلفي، بينما تشير الأسهم الصغرى إلى موقع انقباض معيّن والترددات المرتبطة بها كما ورد في النص.

يظهر الشكل 8-14ترددات رنين التجاويف بوضوح أكبر. هناك سهم متجه إلي الأسفل في أعلى الشكل من اليسار ومشيرا إلى الترددات التي تطابق ترددات رنين التجويف الأمامي، عندما يكون هذا التجويف قصير جدا، كما هو مبين في يسار الشكل، عندما يكون انقباض اللسان قريب من مقدمة الفم، يطابق تردد الرنين التوافق الثالث، والتوافق الثاني ناتج عن نمط اهتزازي أكثر تعقيدا ومرتبط بالانقباض والتجويف الخلفي.

وكلما تحرّك الانقباض مسافة إلى الوراء، ازداد طول التجويف الأمامي وتناقص تردد التوافق الثالث. ويحدث تبديل لهذه المجريات عند نقطة معينة تبعا لاستدارة الشفتين، فيصبح التوافق الثاني مرتبطا بالتجويف الأمامي، ويصبح التوافق الثالث مصدرا للرنين لبقية القناة الصوتية. وفي المناطق التي يكون فيها التوافق الثالث مرتبطا بالتجويف الأمامي يكون هذا التوافق بالذات متأثرا باستدارة الشفتين، وإلاّ فإن التوافق الثاني هو الذي يتأثر.

أيما درجة من درجات استدارة الشفتين، فإننا نشهد تبدّلا في الموقع حيث يغير التوافقيان الثاني والثالث ارتباطهما، وفي هذه المنطقة، فإن تحريك الانقباض مسافة قليلة إلى الوراء أو إلى الأمام لا يؤثر،إلا ما ندر، على أي من الترددين الثاني والثالث، فالصوائت الناتجة في مناطق تكثر فيها حركات نطقية كبيرة دون أن يكون هنالك تغييرات كبيرة في التوافقيات سميت بالصوائت الكمّية quantal vowels،ويسود الاعتقاد بأن هذا النوع من الصوائت هو المفضل في اللغات التي تشهد استقرارا اكوستيكيا على الرغم من وجود تنوع نطقي إلاّ أن هناك مشكلات مرتبطة بهذه الفكرة، فاللسان يمكن تحريكه إلى الخلف وإلى الأمام دون أن يكون له تأثير كبير على توافقيات هذه الحركات ولكن عند خفض اللسان قليلا يؤدي إلى تغيير في درجة الانقباض، سيؤدي بدوره إلى تغيرات كبرى في تردد التوافق الأول كما سبق وأن لاحظنا في مرنان هلمهولتز.

إن التجاويات resonance's التي يمكـــن أن تكـون مرتبطـة بـالتجويف الخلفـي يصعب ملاحظتها، وحينما يكون الانقباض في مقدمة الفم كما هــو مبـين في الشـكل 8.14، يكون التوافق الثاني هو التجاوب الثاني للتجويف الخلفي، ويزداد تردده كلما صغر حجم هذا التجويف و حينما يكون الانقباض في الجزء الخلفي من الفم، يعتمـد التوافق الأول على حجم التجويف الخلفـي. وحينمـا يـتراجع الانقبـاض عـائدا مـن منطقة الحلق (velar) إلي منطقة اللهاة والبلعوم يزداد تأثيره على التجويف الخلفـي إذ يتناقص حجمه محدثا زيادة في تردد التوافق الأول.

وأخيرا، يجب أن نتذكر دائما بأن القناة الصوتيــة ذات شـكل معقـد جـدا. وفي مقدمة كتاب مثل هذا يجدر بنا أن نعتبرها مجرد أنابيب بسيطة وتجاويف يمكن فصلــها، إلا أن أوصافا مثل هذه ما هي إلا تبسيط مبالغ فيه. وإذا ما تسنى لأحد أن يتناول بــالدرس كتبا أخرى، سرعان ما يكتشف ترددات مكوّنات وتجاويات غـير قابلـة للتفسير وفقـا لهـذه الأفكار وما فعلناه هنا ما هو إلا بداية لمساعدتك في فهم الخصائص الفيزيائية لإنتاج الكلام.

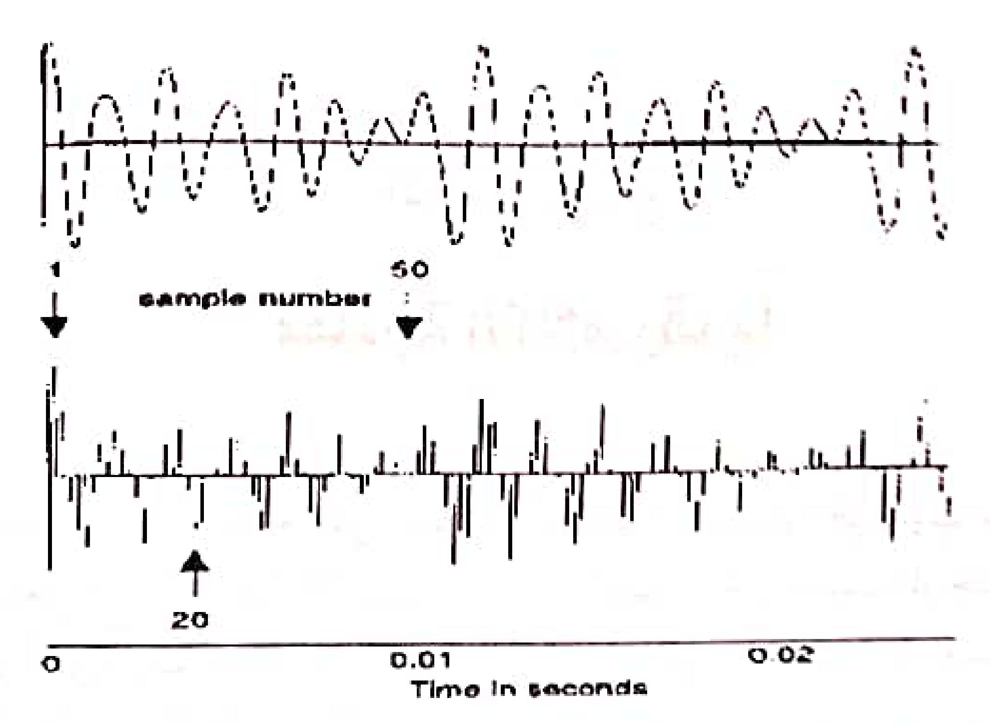
الفصل التاسع

معالجة الكلام رقمياً

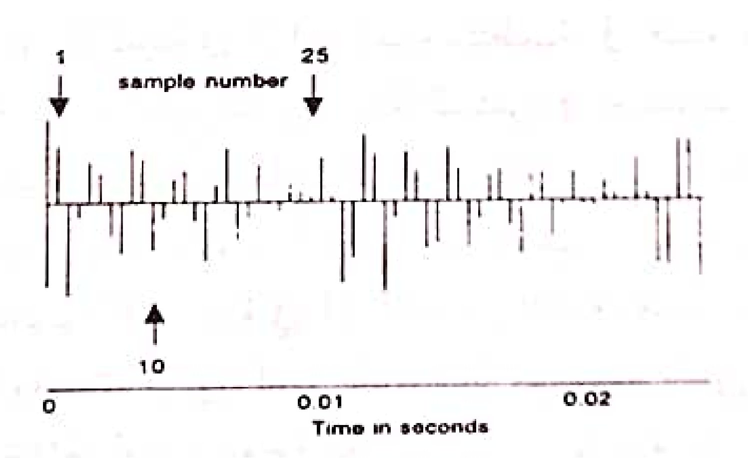
الفصل التاسع

معالجة الكلام رقمياً

تتضمن معالجة الكلام على اختلاف أشكاله استخدام الحواسيب تقريباً، وعلى كل من يشتغل في هذا الحقل أن يعرف كيف ترسم الحواسيب الموجات الصوتية وتمثلها. إن الحواسيب تصف كل شيء بالأرقام. والموجة الصوتية يجب أن تقلص لتصبح سلسلة من الأرقام التي تمثل سعة الحركة الموجية في فترات زمنية منتظمة. ويبين الشكل 9-1 كيف تتم هذه العملية. فالموجة المرسومة في الجزء العلوي من الشكل تمثل موجة صوتية كفولتة متغيرة باستمرار تم تسجيلها بواسطة مايكروفون خلال النطق بالصائت [a]. أما الجزء الأسفل من الشكل فيبين مقدار الجهد (السعة) عندما تؤخذ هذه الموجة كعينة في فترات زمنية منتظمة، في هذه الحالة (50) مرّة في 1/ 100 من الثانية. إننا نستطيع تمثيل الموجة المستمرة في حاسوب بواسطة قائمة من الأرقام المنفصلة(العينات) مطابقة لهذه السعات. وعلى سبيل المثال، العينة رقم (1) هي رقم إيجابي كبير، والعينة رقم (20) هي رقم سالب، والعينة رقم (50) هي صفر تقريبا ، ولما كان هنالك (50) عينة في 1/ 100 من الثانية، هذا إن كانت الموجة قد استمر بقاؤها ثانية واحدة، فيكون لدينا 500 قيمة من القيم التي يجب تخزينها. إن الدقة التي يتم من خلالها تخزين الموجة الصوتية تعتمد إلى حد ما على عدد العينات التي تأخذها في الثانية. ويوضح الشكل 9-2 العينات التي تمثل الموجة في شكل9-1، هذا إن كان هنالك 2500 عينة في الثانية بدلاً من 5000 كما في الشكل 9-1 و في هذه الحالة فإن العينة 25تحدث بعد 1/ 100من الثانية.

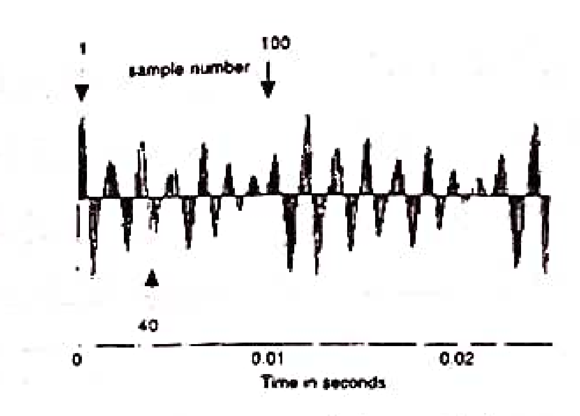


شكل 9-1 في أعلى الشكل: فولتة متغيرة باستمرار سجلت خلال النطق بالصائت [A:]، وفي الأسفل: خطوط تطابق حجم هذه الفولته (السعة) في فترات منتظمة زمنيا.



شكل 9-2 الموجة في الجزء العلوي في شكل 9-1 كما مثلت بعينات السّعة مأخوذة بمعدل 2500 هرتز.

و هناك تمثيل آخر اكثر دقة – لشكل الموجة نحصل عليه عندما تؤخذ العينة بتردد 10.000 هيرتز، كما في الشكل 9-3 وهنا تحدث العينة (100) بعد 1/ 100 من الثانية. لاحظ أن معالم قمم الموجة اكثر وضوحاً

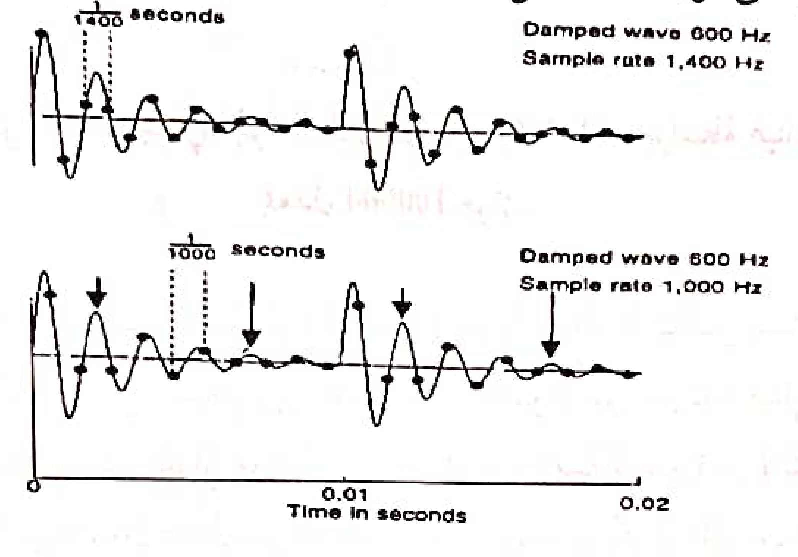


شكل9-3 الموجة في الجزء العلوي من 9-1 كما مُثلت بواسطة عينات السعة بمعدل 100000 هرتز.

إننا إذا ما أخذنا العينة لموجة بسرعة بطيئة جدا، فإننا لن نستطيع تمثيل التنوعات السريعة التي تحدث بين العينات . فالصوت ذو التردد العالي، ستكون تنوعات السعات على التوالي موجبة ثم سالبة في فترة زمنية قصيرة. و لالتقاط هذه التنوعات السريعة، فإن معدل سرعة أخذ العينات يجب أن يكون عاليا جدا. و يجب أن يكون هناك عينة موجبة و عينة سالبة، قبل أن نتمكن من الحديث عن وجود تردد في موجة أخذت عينة. ويوضح الشكل 9-4تكرارين لموجة متضائلة ترددها 100 هيرتز و هي موجة قريبة من موجة الصائت (a:) في كلمة father. إن قمم السعات في هذه الموجة تتباعد عن بعضها بمقدار 1/ 600 من الثانية وبين الجزء العلوي من شكل9-4 ما يحدث عندما تؤخذ عينة بمعدل 1400 هرتز (ويعني هذا الأمر 1400 عينة من الثانية).

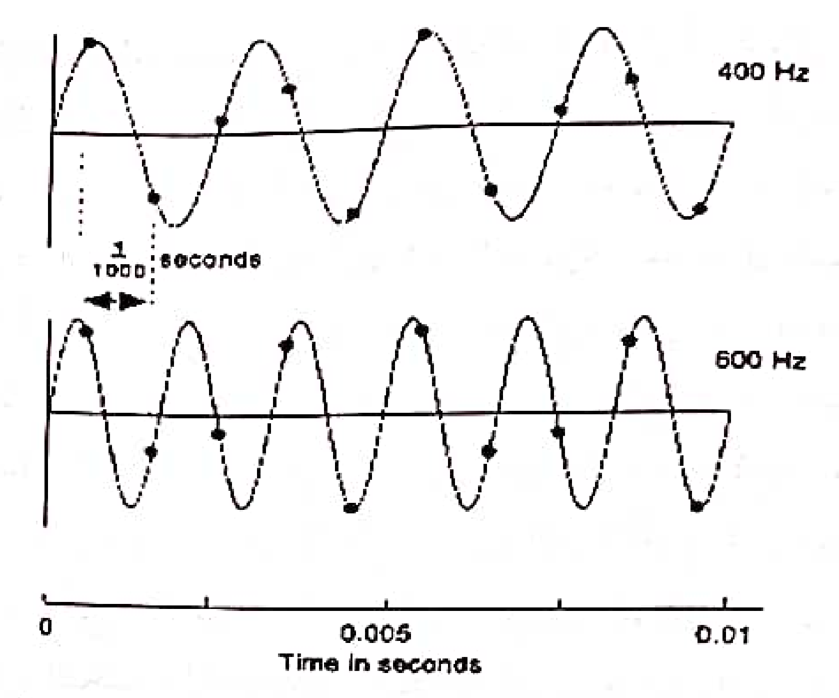
إن الفاصل الزمني بين زوج من العينات لا يتعدّى 1/ 700 من الثانية، وهذا يعني أن هناك دائما عينة واحدة على الأقل في كل قمة موجبة، وعينة أخرى في كل قمة سالبة. وقد لا تمثل العينات السعات في الموجة المتضائلة بشكل دقيق، ولكنها على الأقل تتبادل القيم الموجبة والسالبة بنفس السرّعة التي يتم فيها التبادل بين قيم مشابهة في الموجة المتضائلة. وإذا انخفض معدّل العينة إلى 1000 هرتز، كما هو موضح في الجزء الأسفل من الشكل 9-4، فسيكون الفاصل الزمني بين أزواج العينات 1/ 500 من الثانية، ولم يعد صحيحا القول أن هذه الأزواج من العينات تتبادل القيم الموجبة والسالبة بنفس المعدّل في الموجة. وتشير الأسهم في النصف الأسفل من الشكل إلى

عدد من القمم لم يتم أخذها كعينات. إن حاولت إعادة بناء الموجة المأخوذة كعينة عن طريق رسم خط يصل بين قمم العينات، فستحصل على موجة لا تحتوي على مكـوّن تردده 600 هرتز. إلا أنك إن رسمت خطا بين العينات في الجزء العلوي من الشـكل، فستحصل على موجة ذات شكل مختلف، ولكن لها نفس التردد على الأقل.



شكل 9-4 موجة تحتوي على مكوّن تردده 600 هرتز، تم اختيار العينة بمعدل 1400 هرتز(الجزء العلوي من الشكل) و 1000 هرتز (الجزء الأسفل من الشكل). تمثل الأسهم قمما في الموجة لا يتم تمثيلها عندما يكون اختيار العينة بسرعة أبطأ.

إن التردد الذي يساوي نصف معدّل العينة يعرف باسم تردد نايكوست Nyquist. ويجب أن يساوي هذا التردد أعلى تردد في الموجة التي يتم أخذهـا عينـة. ومـن الأهمية بمكان أن نتأكد أن الموجة التي يتم أخذها عينة لا تحتوي علـى أي تـردد يزيـد عن تردد نايكوست. ويمكن شرح هذه النقطة بـالرجوع إلى شـكل 9-5 الـذي يظـهر تأثير عملية أخذ عينة موجة جيبيه ترددها 400 هرتز و موجة أخرى ترددها 600 هرتز على معدل تردد عيني مقداره ألف هرتز.



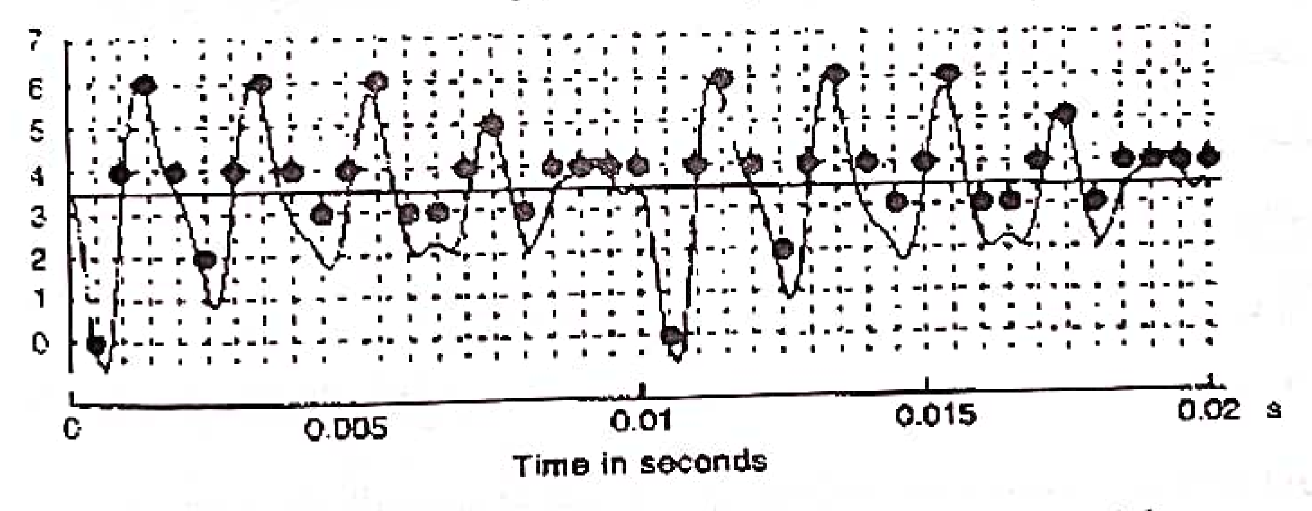
شكل 9-5 موجتان مختلفتان، موجة جيب ترددها 400 هرتز وأخرى ترددها 600 هرتز، كلتاهما اختبرت كعينة على 1000 هرتز. مجموعة العينات متساوية بالنسبة لكلتا الموجتين.

نجد أن الموجة بتردد 400 هرتز قد تم أخذ عينتها بطريقة ملائمة، وحصلنا على عينة موجبة وأخرى سالبة لكل قمة، غير أن الموجة بتردد 600 هرتز، والتي ترددها يزيد على تردد نايكوست ذو 500 هرتز، لم يتم تمثيلها تمثيلاً جيداً. كما أنه لا يوجد أي عينة ضمن بعض الترددات. وما هو مهم بنفس الدرجة، وقد تكون له نتائج وخيمة، إن كانت العينات التي نعتبرها تمثل تمثيلا صادقا الموجة الأصلية لا تحتوي إلاّ على تلك الموجات التي تمثل تردد 400 هرتز.

إن التمثيل غير الصحيح لتردد يزيد عن تردد نايكوست يسمى a liasing، و حيثما أردنا أن نمثل صوتا بالأرقام على حاسوب، علينا أن نتأكد أن الترددات التي تزيد على تردد نايكوست قد تمّ استبعادها قبل أخذ العينات. وإن لم يتم فعل ذلك، فقد لا نميّز بين عينات من موجة يزيد ترددها بمقدار معين عن تردد نايكوست من تلك العينات لموجة أخرى يقل ترددها عن تردد نايكوست.

إن الترددات العالية التي هي موضع اهتمامنـا تصـل إلى حـوالي 11.000 هرتز (وقد تصل مكوّنات بعض الأصوات مثل [s] إلى أعلى من تلك الترددات، إلا أنـها ليست بذات قيمة، ولا يسمعها أناس كثيرون تتجاوز أعمارهم (40) سنة. وبالتـالي، نستطيع أخذ عينات من الكلام عند تردد 22.000 هيرتز، بشرط أن نكـون واثقين ألا يكون هنالك أي ترددات أعلى من هذا التردد من أي مصدر آخر. وباستطاعتنا إزالـة الترددات العالية عن طريق وضع الإشارة signal. في مرشح قـادر علـى إزالـة هـذه الترددات، وهذا المرشح يســمى مرشـح إمـرار الـترددات المنخفضـة. عندمـا ينصب اهتمامنا على الصوائت وأصوات الكلام الأخرى التي لا تحوي على معلومـات فـوق 5000 هرتز، نستطيع أخذ عينات بتردد 10.000 هيرتز، بشرط أن يكون لدينـا مرشـح إمرار الترددات المنخفضة لإزالة جميع الترددات التي تزيـد عـن هـذا الحـدّ. إن معـدّل أخذ العينات القياسي لتسجيلات موسيقية ذات نوعية عالية هي 44.000 هرتز.

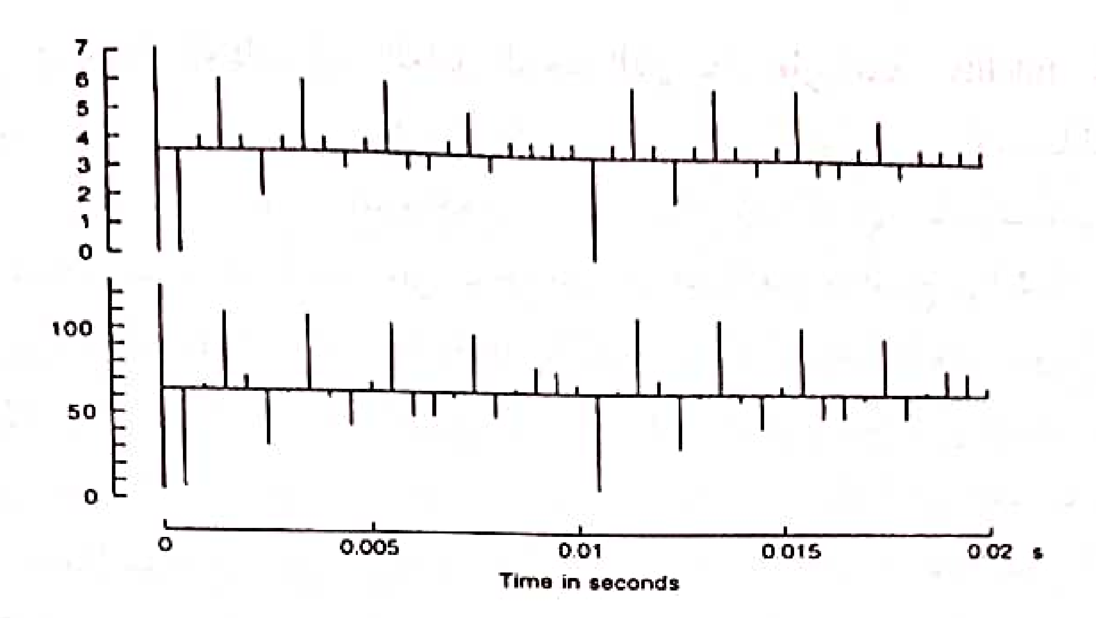
وهذا يعني أن جميع الأصوات، حتى تلك الأصوات التي يمكن لآذان مرهفـة فتيّة سماعــها، موجـودة. إن الحيوانـات الصغـيرة مثـل الكـلاب والقطـط هـي الـتي بمقدورها أن تسمع ترددات تزيد على 22.000 هرتز.



شكل 9-6 موجة اختبرت كعينة بتردد 5000 هرتز وبثماني مستويات محتملة للسّعة، ينبغي أن تكون العينات على تقاطع أحد خطوط الشبكة التي تبين الثمان سعات، كما ينبغي أن يشير أحد خطوط الشبكة إلى الفترات الزمنية.

إن معدّل العينات ليس العامل الوحيد الذي يؤثر على أمانة fidelity تخزين الصوت في الحاسوب. يتعين علينا أن نأخذ بالحسبان الأرقام التي نختارها لتمثيل الفروقات في السعة، عندما نقوم بجمع عينات للكلام لإدخالها في الحاسوب فإن عملنا هذا بمثابة وضع شبكة grid على موجة صوتية، كما هو موضح في الشكل 9-6، وتخزين الأرقام المطابقة لنقاط محددة على الشبكة، وهكذا، فإننا نقوم بتحويل كمياً الحركة الموجية إلى أرقام وفقا لبعدين اثنين، أحدهما يطابق زمن كل عينة، والآخر يطابق السعة في ذلك الوقت. ومن الواضح، أن حجم كل خطوة من خطوات السعة يعتبر عاملا مهما في تمثيل الحركة الموجية، وكلما كان حجم كل خطوة أصغر، ازدادت الدقة التي نتوخاها في تمثيل الموجة، وبالإضافة إلي أهمية أخذ عينات لكل موجة بعدد كاف من المرات (وبهذه الطريقة نجعل الخطوات الزمنية أصغر ما يمكن لكي نسجل جميع الترددات الموجودة)، فإننا نريد أيضا من أن نتأكد من أن حجم كل خطوه من خطوات السعة صغير بما فيه الكفاية. وبسبب الطريقة التي يجب أن تخزن فيها في الحاسوب، فإن السعات التي تؤخذ عينات لها يجب أن تكون أعداداً صحيحة موجبة. ولسهولة الإيضاح، فإننا نعرض ثماني مستويات محتملة للسعة في الشكل 9-6 وهي تعكس الأرقام من صفر - 7، وما نعتبره في الحقيقة ضغط الصفر للصوت يطابق مستوى متوسطا بين المستويين 3و 4، إن هذا التمثيل غير دقيق للسعة، تمثيل غير قادر على تمييز تنوعات صغيرة كثيرة.

يوضح الشكل 9-7عينات السعة بنفس الطريقة التي اعتدنا على رسمها بيانيا في الأشكال السابقة، وفي الشكل العلوي 9-7، لا يوجد سوى ثماني خطوط تطابق الثماني مستويات المحتملة للسعة في الشكل 9-6. ويوضح الجزء الأسفل من الشكل السعة ممثلة بطريقة أدق ويشتمل على 128 مستوى محتملاً من مستويات السعة.



شكل 9-7 كميتان مختلفتان لمستويات سعة الموجة في الشكل 9-6. في الجزء الأعلى من الشكل، هناك ثماني مستويات سعة كما في الشكل 9-6، في الجزء الأسفل من الشكل، هناك 128 مستويات محتملة للسعة.

ولكي نفهم كيف تؤثر الفروق في عدد مستويات السـعة المحتملة على تحاليل الحاسوب للأصوات، يتعين علينا ان نشرح كيـف تخزن الحواسيب الأرقام. تعمل الحواسيب وفقا لأرقام ثنائية تسمى bits. الرقمان صفر و 1 تخزنان في bit واحد، ولكن الرقمين 2 و3 يحتاجان إلى عدد 2 bit. والأرقام 4 و 5، 6و 7 تتطلب 3 bit.

ويوضح الجدول 9-1 بعض الأرقام حسب النظام المئوي المألوف بالطريقة الثنائية. ومن الملاحظ أن الأرقام صفر - 7 تتطلب 3 bit والأرقام صفر - 15 تتطلب 4 bit. ويوضح الجدول 9-2 عدد bits المطلوبة لتخزين أرقام اكبر. ولما كانت الحواسيب تعتبر 8 bit كلمة حاسوبية واحدة (بايت واحد one byte) من المهم أن نلاحظ أن 256 مستوى محتمل من مستويات السعة (0 - 255) تتطلب 8 bit و 65532 مستوى تتطلب 16 bit (كلمتين).

إن معظم أخذ العينات حاسوبيا يتم عن طريق كلمات بأكملها، في الغالب 8 bit كمياً (256 مستوى محتمل)، أو 16 bit كمياً (536، 65 مستوى محتمل). نستطيع استخدام هذه الأرقام لاحتساب الفرق بالدسبل بين اصغر صوت واكبر صوت يمكن للحاسوب تخزينه في

جدول 9-1 الأرقام الثنائية والعشرية.

Decimal	Binary	Number of Bits
0	0	1
1	1	1
2	10	2
3	11	2
4	100	3
5	101	3
6	110	3
7	111	3
8	1000	4
9	1001	4
10	1010	4
11	1011	4
12	1100	4
13	1101	4
14	1110	4
15	1111	4

جدول 9-2 عدد البت المطلوبة لمدىً معين من الأرقام.

Range of Numbers	Number of Bits
1–32	5
1–64	6
1–128	7
1–256	8
1–512	9
1–1,024	10
1–2,048	11
1–4,096	12
1–8,192	13
1–16,384	14
1–32,768	15
1–65,536	16

ظروف مختلفة. وباتباع عملية تخزين ذات 8 bit، فإن النسبة بين اكبر صوت واصغر صوت ستكون 255 – 1. رأينا في الفصل السابق بأن الفرق بالدسبل بين صوتين يساوي 20 ضعفاً لوغارتم نسبتهما الفولتية. وهكذا، إن كانت اكبر سعة تساوي 255 واصغر سعة تساوي (1)، فهذه النسبة هي 255. ولوغارتم 255هو 4ر2، فيكون الفرق بالدسبل مساويا ل

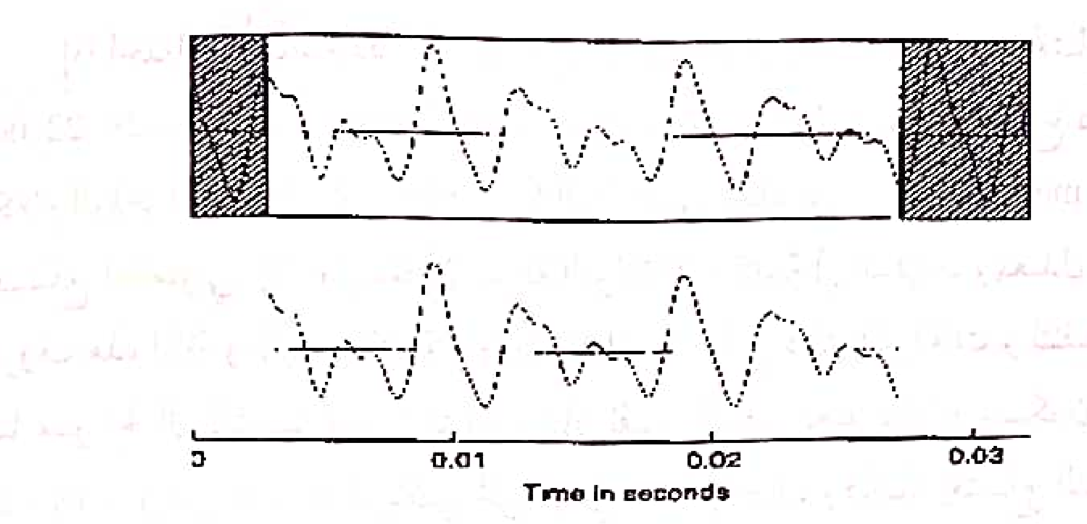
20 X2ر4 = 48 دسبل. وبعينات ذات 16 bit، فإن النسبة بين اكبر صوت واصغر صوت ستكون 535ر65 إلى (1). لوغارتم 535ر65 هو 8ر4، إذن، الفرق بالدسبل هو

x20 8ر4 = 96 دسبل. إن المقاييس الكميه للتسجيلات الصوتية الرقمية ذات الأمانة العالية هي 16 bit، مع الحفاظ على مستوى للشدة مقداره 96 دسبل، وهو أقصى حد لمستويات الشدة التي يمكن للأذن البشرية أن تتحملها دون الإحساس بالألم.

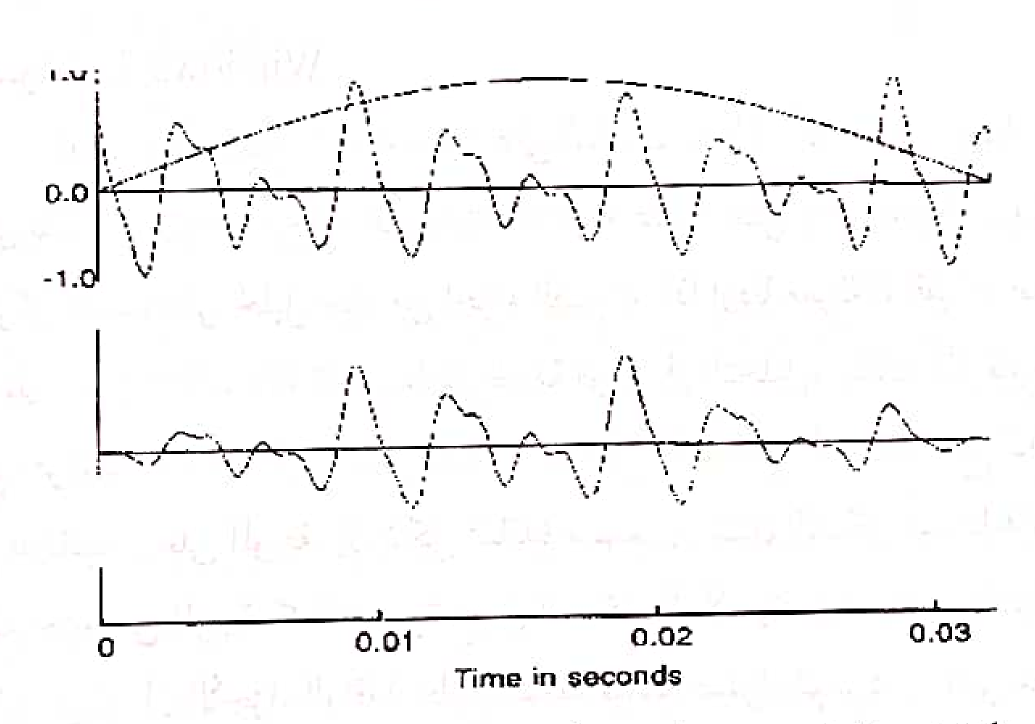
إذا أخذنا عينات بتردد 22٫000 هرتز، مستخدمين 16 bit، سوف نحتاج إلى 22٫000 2x = 44٫000 byte (44 k computer words). وسوف نحتاج دقيقة الكلام الواحدة إلى 44٫000 60x = 2840K على الحاسوب - تقريبا 3 meg في المصطلح الحاسوبي. إذا افترضنا أن سرعة القراءة 140 كلمة في الدقيقة، وبمعدل 3، 5 لحروف هذه المائة والأربعين كلمة (characters) (بما في ذلك الفراغات والتنقيط)، كما هو الحال بالنسبة لهذا الكتاب، فإن نفس النص بعد كتابته سيكون 740 character. وكل character يمكن تخزينها في byte واحد، وهكذا يحتاج النص المكتوب إلى 740 byte أو اقل من K واحد من الذاكرة على الحاسوب. ان تحويل كلام من نوعية عالية إلى الكتابة يفقدة كل السمات المميزة للغة المنطوقة إلا أنه أيضا يتضمن اختصارا نسبته 3000-1 من مخزون الحاسوب.

النوافذ Windows

نختتم هذا الفصل بإعطاء مثلين على أساليب معالجة الكلام حاسوبيا. الأول يتعلق بفكرة أسموها "فتح النوافذ" windowing.عندما نحلل جملة منطوقة، يروق لنا ان نركز الانتباه على تحليل جزء من اجزاء الصوت. اذا اردنا معرفة توافقيات صائت ما، على سبيل المثال، فإننا نقوم بتطبيق طريقة فورير في التحليل، وذلك بالتركيز على بضع حركات موجية تخص وسط الصائت. ويتسنى لنا فعل ذلك، بوضع نافذة - قناع به ثقب - على الموجة. إن شكل النافذة مهم. إن كان الشكل مستطيلا، فقد نقتطع جزءا من الموجة، كما هو موضح في الشكل 9-8. ونفترض تطبيقات كثيرة لتحليل فورير أن الأجزاء الواقعة خارج النافذة قيمتها صفرا. ثم نركز على معالجة الموجة الظاهرة في أسفل الشكل 9-8،وكأن لها بداية مفاجئة ونهاية مفاجئة. وكما رأينا في السابق، فإن الأمواج ذات التغيرات المفاجئة لها مكونات بترددات عالية جدا. وسوف يتضمن تحليل ذلك الجزء من الموجة الذي تتضمنه النافذة ذات الشكل المستطيل هذه الترددات العالية، ويكون ذلك خطأ، لأن هذه الترددات غير موجودة في الموجة الأصلية.



شكل 9-8 نافذة مستطيلة رُكِبَتْ على موجة (في أعلى الشكل) بحيث أن الجزء السّفلي هو الوحيد القابل للتحليل.



شكل 9-9 نافذة هاننج ركبت على موجة ونتيجة مضاعفة هذه الموجة بواسطة النافذة

ويمكننا معالجة هذه المشكلة باستخدام طريقة أخرى لفتح النوافـذ اكـثر تطـوراً من الأولى.

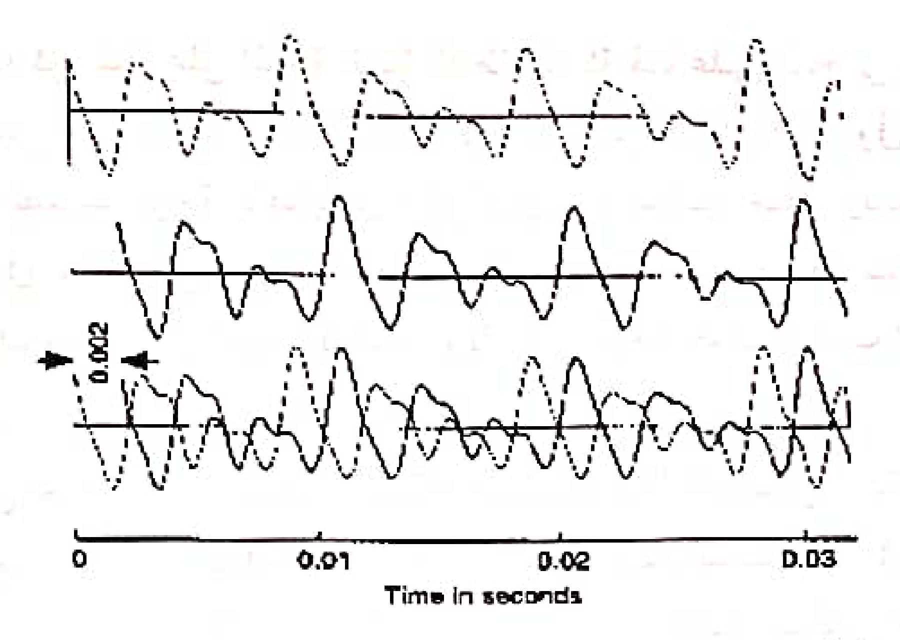
يوضح الشكل 9-9 طريقة أخرى لتمثيل النافذة،عوضا عن إظهار ذلك الجـزء من الموجة قمنا بمطابقة منحنى يسير من نقطة الصفر إلى الرقـم واحـد ثـم يعـود مـرة

أخرى. إذا ضربنا كل نقطة على الموجة بقيمة النقطة المقابلة لها على المنحنى الممثل للموجة، فسنحصل على الموجة المبينة في الجزء الأسفل من شكل 9-9. وفي بداية النافذة ونهايتها، تضرب الموجة الأصلية في صفر أو في رقم صغير جداً، ولهذا فإن الموجة المحصورة في النافذة هي صفر أو صغيرة جداً. وفي وسط النافذة، تضرب الموجة الأصلية في واحد، وهكذا فإن الموجة لا تتأثر، ولا تتغير الموجة حول متصف النافذة كثيراً.

إن المنحنى الخاص الذي نستخدمه لشكل النافذة في 9،9 يسمى دالة هاينج بلاكمان وهامنج Haning function. وهناك دالتان أخريان تستخدمان في تحليل الكلام هما دالتا Hamming و .Blackman وكل من هاتين الدالتين تعملان على تسوية حواف شريحة الحركة الموجية التي يجري تحليلها، إن أي طريقة لتحديد منحنى يرتفع بسلاسة من نقطة الصفر تقريبا ويصل إلى مستوى مستقر حوالي 1.0 قبل أن يأخذ في النزول بسلاسة إلى درجة الصفر مرة أخرى هو منحنى مرض بالنسبة لجميع أشكال التحليل. من السهل تطبيق نافذة على حركة موجية رقمية يتم تمثيل كل نقطة فيها برقم. إن العملية عملية ضرب بسيطة يمكن إجراؤها على الحاسوب.

الترابط الذاتي

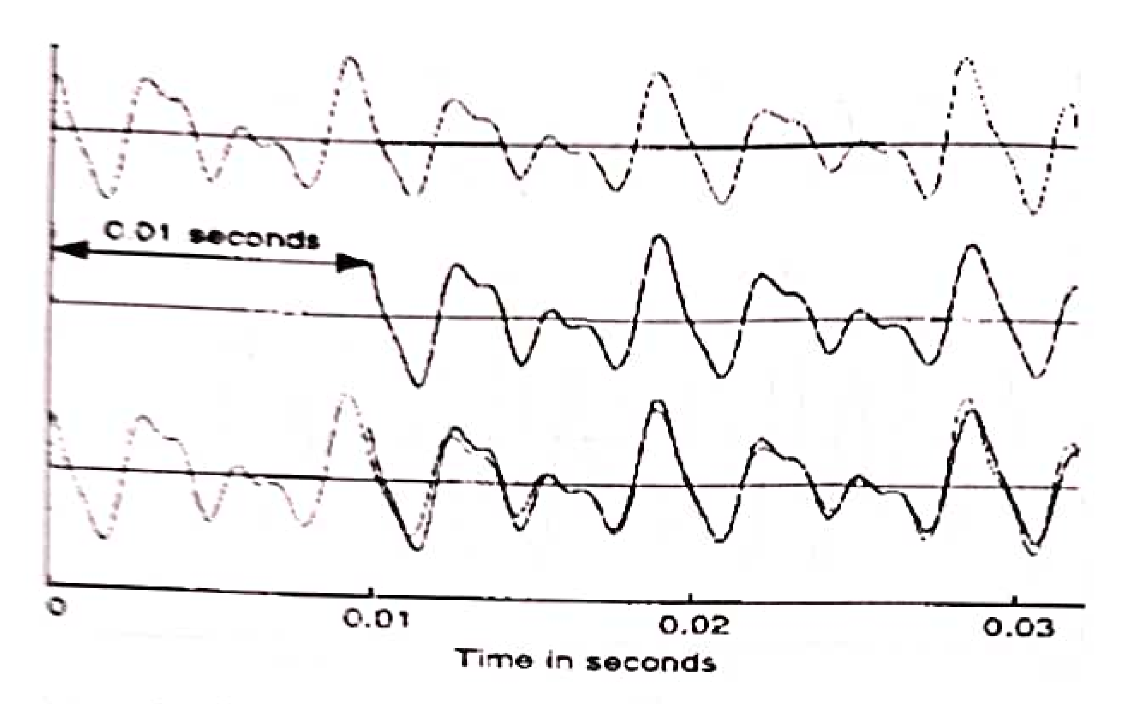
إن آخر عملية حاسوبية نلفت الانتباه اليها هنا هي عملية الترابط الذاتي. وتستخدم هذه العملية لايجاد التردد الأساسي لموجة من الموجات الصوتية. لنبدأ بدراسة موجة كلام كتلك الموجة الموضحة في أعلى الشكل 9-10 (وهي الموجة ذاتها في الشكل 9-9)، هذه موجة كلام حقيقية، ومن ثم فهي لا تكرر نفسها كل 1/ 100 من الثانية تماماً كلما حدثت نبضة مزمارية جديدة. ومع ذلك، من الممكن أن نتبين أن هذه الموجة لها تردد 100 هرتز وأن لها تجاوباً (نغمة توافقية) بتردد 300 – 400 هرتز مطابقة للقمم الصغرى في الموجة المتضائلة الناتجة عن النبضة المزمارية.
والآن لندرس نفس الموجة التي يتم تأخيرها بمقدار عشوائي
(0. 0035s) كما هو واضح في وسط الشكل 9-10)



شكل 9-10 موجة كلام (الأعلى في الشكل) ونسخة طبق الأصل للموجة الأولى تم تأخيرها بحوالي 0،002 ثانية (في وسط الشكل)، وهاتان الموجتان ركبتا على بعضهما البعض (في أسفل الشكل).

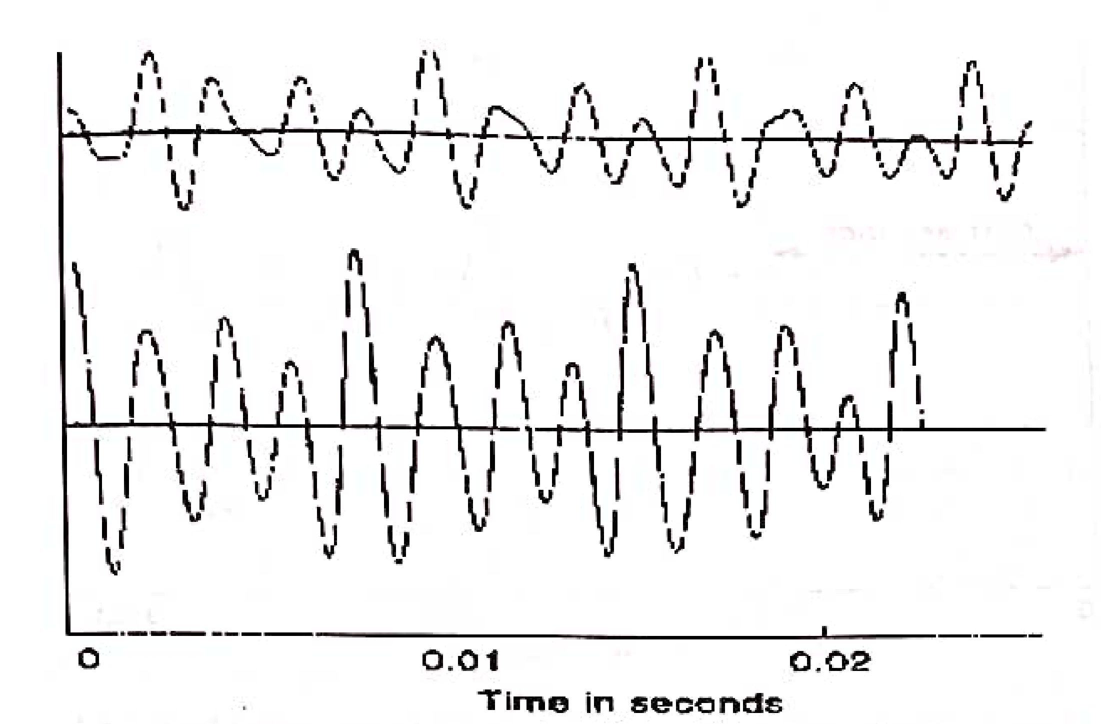
لا يوجد قدر كبير من الشبه بين هاتين الموجتين كما نرى في أسفل الشكل، حيث جرى مطابقة بينهما. ويبرز وضع مختلف عندما نعقد مقارنة بين الموجتين بعد فترة تأخير تقابل الفترة بين نبضات مزمارية كما هو موضح في الشكل 9-11. إن الترابط بين هاتين الموجتين ليس كاملاً لعدة أسباب: الفترة الزمنية بين النبضات ليست ثابتة، وقد يكون هنالك بعض التحركات النطقية التي تحدث تغيرات في التوافقيات، وسيكون هنالك تفاعل بين الموجة المتضائلة من نبضة وبين بداية الموجة المتضائلة للنبضة التالية. ومع ذلك، هناك توافق في أجزاء الموجة المقابلة للنبضة الواحدة والنبضة التي تليها.

نرى في الشكلين 9-10 و9-11 أننا عندما نؤخر موجة بكميات مختلفة ونقارنها مع نفسها، نجد أن درجة التوافق تتباين تبعاً للتأخير. إن دالة الترابط الذاتي هي مقياس لدرجة التوافق لعدد من فترات التأخير المختلفة. ويمثل الشكل 9،12 دالة الموجة في الشكلين 9،11 و9،12،حينما يتفاوت التأخير من نقطة واحدة إلى كمية تطابق تقريبا ثلث النافذة بأكملها. حينما يكون التأخير نقطة واحدة فقط، كما هو موضح على يسار الشكل، نجد توافقاً جيداً بين



شكل 9-11 نفس موجة الكلام في شكل 9-10 (أعلى الشكل) نسخة من الموجة تمّ تأخيرها بمقدار 0.01 ثاينة (في الوسط)، وهاتان الموجتان تم تركيبهما فوق بعض (في أسفل الشكل).

الموجة الأصلية والموجة التي جرى عليها التأخير. وهذا الأمر لا يثير الدهشة لأن النقاط المتجاورة في الموجة لا تختلف كثيراً. إن القمة الرئيسة التالية تأتي عندما يكون التأخير 0.01 ثانية. وهناك قمة رئيسية أخرى حينما يكون التأخير 0.03 ثانية وهناك قمم أصغر بين هذه القمم تنشأ نتيجة للتأخير الموازي لترددات التوافقيات.



شكل 9-12 موجة الكلام في الشكل 9-10 (في الأعلى في الشكل) ووظيفتها الارتباطية الذاتية

إن دالة الارتباط الذاتي تساعدنا في تحديد درجة الصوت. فأول قمة رئيسة تحدث في زمن (0.01 من الثانية في المثال الحالي) وهي البديل للتردد الأساسي (100 هرتز في هذا المثال). وتحدث مشكلات عرضية عند استخدامنا لهذا الأسلوب من أجل استخلاص درجة الصوت فعلى سبيل المثال، قد تكون القمم المرتبطة بالتوافقيات كبيرة نوعا ما. إلا أنه من الأسهل أن تجد قمما رئيسة في دالة الارتباط الذاتي منها في شكل الموجة الأصلية، لا بل من الأيسر أن تجد القمم في دالة الترابط الذاتي إذا ما طبقناها على شكل موجة تم استئصال قدر كبير من التنوع الناتج عن التوافقيات. وسنبحث كيف يتم فعل ذلك في الفصل الأخير من هذا الكتاب.

الفصل العاشر

تحليل فورير

الفصل العاشر

تحليل فورير

لقد تجنب هذا الكتاب في معظم أجزائه النهج الرياضي للمسائل الأكوستيكيّة معتمدا بدلا من ذلك الأساليب البيانية ما أمكن ذلك، وفي الفصلين الأخيرين سوف نستمر بافتراضنا بأن القارئ لا يعرف بتاتا، أو أنه نسي معظم الرياضيات فيما عدا المفاهيم الرياضية الأساسية. ومع ذلك، فإننا سوف نقدم ما يكفي من الرياضيات لتبيان وعرض كيفية استخدام الحاسوب لتحليل الكلام. وسنقوم بذلك دون اللجوء إلى التكامل أو إلى المصفوفات الجبرية. وبالنسبة لأولئك المهتمين، فإننا سنقدم عينات من البرامج المحوسبة والتي ستؤطر الفكرة المعنية، وبالإمكان التغاضي عن هذه البرامج بأمان، ولكن يجب أن تكون مفهومة حتى بالنسبة إلى أولئك الذين لم ينظروا إلى برنامج حاسوب من قبل. وإنه لمن المفيد لدى شخص يعمل بصوتيات الموجات أن يتعلم شيئا عن البرمجة.

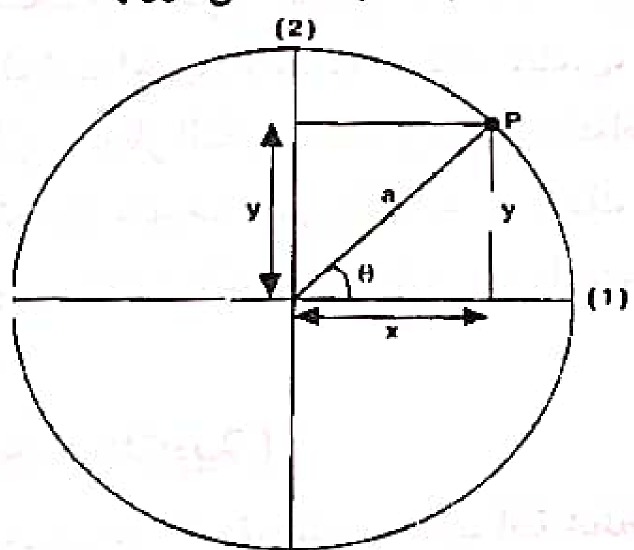
الموجة الجيبية (جيب الزاوية)

حتى الآن لم نعرف الموجة الجيبية، لقد رسمنا ببساطة مخططات الموجات الجيبية مظهرين أنها دالأت (functions) ذات شكل معين، تأخذ بالتدريج في الزيادة أو النقصان. وقبل أن نذهب لما هو أبعد في فهم تحليل الكلام يجب أن نقوم بوصف هذا الشكل بدقة أكثر، وبمصطلحات رياضية بسيطة.

وسوف نبدأ بدراسة الحركة للنقطة (P) متحركة حول المحيط بدائرة نصف قطرها (a) بمعدل ثابت وبدورة واحدة سرعتها 100/ 1من الثانية كما هو موضح بالشكل 10-1 وسوف تقوم هذه النقطة بعمل 100 دورة في الثانية وكما سنرى أيضا بأنه يمكن اعتبارها محددة لموجة جيبية تساوي 100 هرتز.

وإذا قمنا برسم مثلث قائم الزاوية بقاعدة تمتد على القطر الأفقي للدائرة (المحور السيني) طرفه عند النقطة (P) يمكننا تعريف الطول (y) الصادي بأنه المسافة من النقطة (P) إلى ذلك القطر. وكلما دارت النقطة (P) حول الدائرة فإن المسافة ستتغير وفقا لذلك الدوران.

عندما تكون النقطة (P) بالقرب من (1) على الدائرة فإن (y) ستكون صغيرة جدا بينما قرب النقطة (2) فإنها ستصل ذروتها بحيث تكون (a) نصف قطر الدائرة، وإذا اعتبرنا بأن المسافات السفلى الممثلة بأرقام سالبة فإن (y) سوف تتغير ما بين القيم القصوى (a+) و القيمة الدنيا (a –) بمعدل 100 مرة لكل ثانية، كما أننا سنلاحظ بأنه عندما تكون (P) قرب (1) على الدائرة فإن طول (y) سوف يكون صغيرا ولكن متغيرا بشكل سريع، بينما عندما تكون P قرب (2) فإن (y) ستكون كبيرة ولكن متغيرة بشكل أكثر تباطؤا كلما اقتربت وابتعدت عن ذروتها.

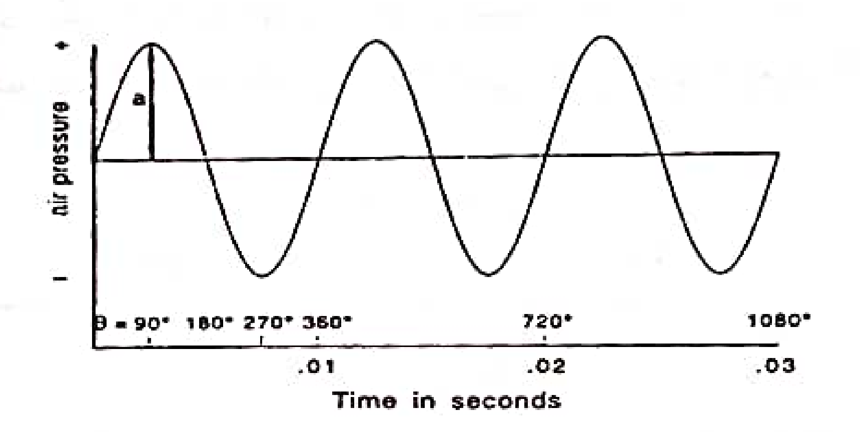


شكل 10-1 نقطة تتحرك عكس عقارب الساعة حول دائرة بسرعة 100 دورة في الثانية.

وهذا التغير في قيمة (y) هو ما يعرفه الرياضيون بالمعامل الجيبي. وهذا المعامل يعتمد على الزاوية(T) والتي تتزايد بمعدل ثابت كلما تحركت النقطة (p) حول الدائرة. وبالمصطلحات الرياضية فإن النسبة بين (y) ونصف القطر للدائرة يعرف بجيب الزاوية(T). ويكتب جيب الزاوية المعينة بالشكل جا(T) ومنه y/a = جا(T) و y =

a جا(T) والزاوية تتزايد بشكل ثابت مع الزمن، دورتين حول الدائرة تعادل 720° و ثلاث مرات حولها تعادل1،080 °، ولهذا فإن الرسم البياني لِ y كمعامل للزمن يعتبر هو الرسم البياني للموجة الجيبية كما هو موضح بالشكل10-2.

إن أقصى ارتفاع للموجة في الشكل 10-2 هوα. و لما كانت النقطة (P) تدور 100 دورة في الثانية يمكننا أن نلاحظ بأن التغيرات في جا(T) كمعامل للزمن وعندما تكون T = 90° درجة، فإن y ستكون مثل a و جا(T)= a/ a ويساوي 1. وعندما تكون T = 180° فإن y= صفراً و جا(T)= صفر/ a ويساوي صفر وعندما تكون T = 270 درجة فإن y =a- ، و جا(T)= - a/a = -1. والزاوية(T) سوف ترتفع من صفر° إلى 360 ° خلال دورة واحدة كما هو مبين بالشكل 10-2 و طالما استمرت الموجة في البقاء فإن الزيادة مستمرة.

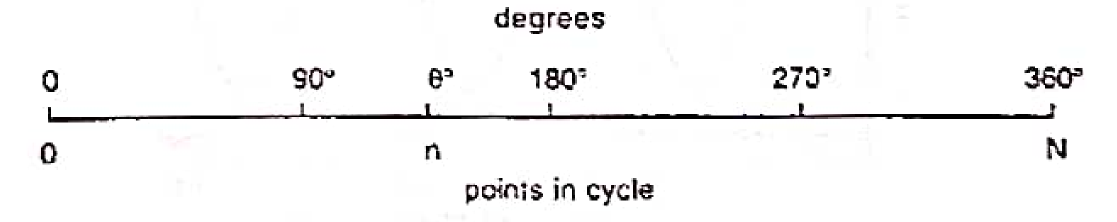


شكل 10-2 موجة جيبية سعتها a و ترددها 100 هرتز.

والآن لنفكر كيف يمكن تمثيل الموجة الجيبية في الكمبيوتر، وكما شاهدنا في الفصل السابق فإنها تخزن على شكل ارتفاعات (قمم) لعدد من النقاط البحتة. أما بالنسبة لعدد النقاط الموجودة في الدورة الكاملة للموجة الجيبية، فذلك يعتمد على المعدل العيني و على تردد الموجة الجيبية. وعندما يكون المعدل العيني 10،000 هرتز (وذلك يعني أن هناك 10،000 عينة في الثانية)، والتردد يساوي 100 هرتز (وذلك يعني 100 دورة في الثانية الواحدة) فإن كل دورة عندئذٍ ستحتوي على 10،000/ 100 = 100 نقطة، و الأغلب فإن عدد النقاط في الدورة N تساوي المعدل العيني / التردد بالهرتز.

وكما رأينا سابقا فإن السعة y في كل نقطة في الموجة الجيبية يعتمد على a جا(T)حيث a هي أقصى سعة والزاوية (T) تتغير من صفر° إلى 360° في الدورة. الآن دعنا نأخذ أي نقطة n وهي واحدة من نقاط N والممثلة في داخل الدائرة، يمكننا تمثيل العلاقة بين النقطة n والزاوية(T) كما هو موضح في الشكل 10-3. ومنه فإن n/N = T/360, T = (n*360)/N. ويمكننا أن نرى أيضا أن الارتفاع لهذه النقطة Yn = aجا(n*360/N).

وفي هذه النقطة فإنه يتوجب علينا أن نتعامل مع تعقيد بسيط إذا أردنا أن نرى كيفية تخزين الحاسوب للنقاط المقابلة لتلك الموجودة في الموجة الجيبية، وعند القيام بالحسابات المعنية بالموجات فإنه من المعتاد تمثيل الزوايا بواسطة التقدير "القوسي" وليس بواسطة الدرجات. والتقدير القوسي "الراديان" مثلما هي الدرجة مقياس للزاوية. ويعرف "الراديان" بأنه النسبة بين طول القوس ونصف قطر الدائرة. وإذا كان نصف القطر r فإن المحيط يساوي 2πr، ولهذا فإن هذا القوس (أي المحيط) يعرف الزاوية = 2π = 2πr/r راديان.



شكل 10-3 العلاقة بين زاوية θ في دورة كاملة (360°) و نقطة عينية n في موجة بها عدد نقاط عينية N في دورة واحدة.

وإذا كانت الدائرة الكاملة (360°) تساوي 2π راديان فإن 180° تساوي π راديان ، أو تقريبا 3،14 راديان والزاوية القائمة (90°) تساوي (π/2) راديان وتساوي (1.57) راديان، ويوضع ذلك كله على شكل مخطط كما في الشكل 10-4 نستطيع أن نرى بأن الراديان الواحد = (57.3°).

degrees

0 57.3° 90° θ 180° 270° 360°

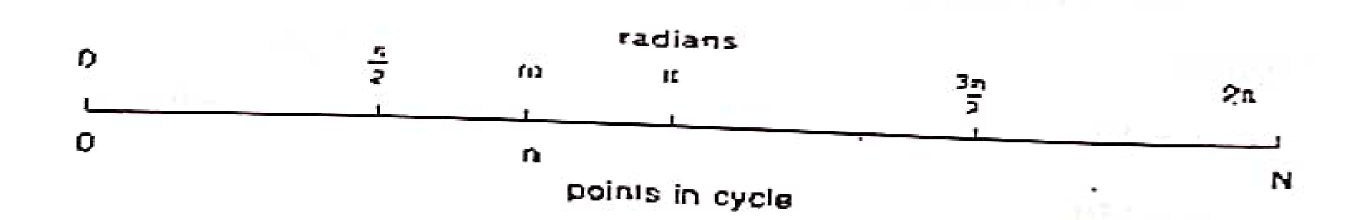
0 $\frac{\pi}{2}$ ω π $\frac{3\pi}{2}$ 2π

0 1.0 1.47 3.14 4.71 6.28

radians

شكل 10–4 العلاقة بين الزوايا بالدرجات و التقدير القوسي.

إذا كانت النقطة تتحرك حول الدائرة بتردد يساوي 100 هرتز فانها ستطوف 100 مرة 2π راديان في الثانية، وبعبارة أخرى فإنـه سـيكون لهـا تـردد يسـاوي 200π راديـان وبشكل عام فإن التردد لـ f هرتز يتناسب مع السرعة الزاويّة $2\pi f$ راديـان لكـل ثانيـة. وفي الدراسات الفنية لصوتيات الكلام فإن الترددات عـادة مـا يعـبر عنـها بمصطلحـات تعرف بتردد الزاوية وهو راديان لكل ثانية، ويمثل في العادة بالحرف اللاتيني أو ميغا (ω) ومثل ذلك عندما تحسب عن طريق الحاسوب فإننا نحتـاج أن نعبر عـن الـتردد بواسـطة الراديان. وإذا أخذنا بالاعتبار ارتفاع النقطة (n) وهي إحدى نقاط N الـتي يتـم تمثيلـها بالدائرة فإنه يمكن تمثيل العلاقة كما هو موضح بالشكل10–5 ولهذا فإن $n/N = \omega/2\pi$, $\omega = (n*2\pi)/N$. ومنه فإنه يمكن أن نعيد كتابة تعبيرنا عن الارتفاع ونقول بأن $a = Yn$ جا$(N/ (n*2\pi))$.



شكل 10–5 العلاقة بين زاوية ω في دورة كاملة من 2π راديان و نقطة عينية n

في موجة بها عدد N من النقاط العينية في دورة واحدة.

ويمكن تلخيص كل ذلك، ونتعلم شيئا عن برمجة الحاسوب باستخدام هذه التعبيرات بكتابة برنامج يرسم مخطط الموجة الجيبية. وإن أردت فإنه يمكن القفز عن بقية هذا القسم والذهاب مباشرة إلى القسم المعنون بالموجة الجيتمامية (جيوب التمام) "cosine waves" وإن أردت أن تتأكد بأنك حقيقة يمكن أن تفهم ما يتوجب عليك فهمه فإنه يجب عليك أن تتعلم كيفية كتابة برنامج حاسوب وأن نقوم بذلك، وبهذه الطريقة سوف تتأكد بنفسك من أنه لن يكون هناك افتراضات فاتتك.

وهذه نسخة من برنامج كتب بلغة باسكال. سوف يقوم هذا البرنامج برسم خط على شاشة الحاسوب متناسبة مع موجة جيبية تساوي 100 هرتز مبتدئين من نقطة عشوائية على الشاشة ممثلة (X ، Y) والتي بإمكانها وبكل يسر على الحاسوب أن تعمل 100 نقطة من اليسار(X = 10)، و 150 نقطة باتجاه الأسفل من القمة (150Y =). وبالرجوع إلى ما قيل سابقا عن العلاقة بين عدد النقاط في الدائرة والمعدل العيني والتردد بإمكانك أن تتبع كل عبارة حتى وإن لم تقم بأي برمجة في السابق.

ولا يعتبر هذا البرنامج أكفا طريقة لرسم مخطط حيث أن بعض الخطوات الإضافية يمكن وضعها لكي نجعل منه برنامجا أكثر قابلية للقراءة.

```
program SineWave;
const {The terms that we will consider to be constant, fixed for this
program}
    x = 10;
    y = 150;
    SampleRate = 10000;
    Frequency = 100;
    Amplitude = 127;        {This is arbitrary amplitude factor_under half
256, which is
```

convenient for computers that use a maximum of 256 values}

pi = 3.14; {An approximation for π}

var {The types of variables that we will need}

pointsInCycle,pointAmp,n: integer; {all these are whole numbers}

realAmp,angle:real; {a real number is stored as a number with a decimal point

included. Only integers can be used in computer graphs}

begin

pointsInCycle := round(SampleRate/Frequancy); {rounded off to an integer}

moveTo(x,y); {move to the starting point of the graph}

for n:=1 to pointsInCycle do {we want to loop through for the following for each point}

begin

angle:=(2*pi*n/pointsInCycle); { the angle in radians is the 2π times the

proportion of the way through the cycle}

{n = 1 the first time through the loop,

n = 2 the second time through, and so on,

```
                              increasing    till    n    =
pointsInCycle.}
            realAmp:= Amplitude*sin(angle);   {the real amplitude for
this(and each) point}
            pointAmp:= round(realAmp);        {turn the amplitude in to
an integer}
            lineTo(x+n,y-pointAmp);                {draw a line to this
point}
        end;
    end.
```

إذا كانت السرعة هي المطلوبة في تنفيذ هذا البرنامج، فإننا نستطيع أن نقلل عدد عمليات الضرب و القسمة بدمج بعض جُمل البرنامج مع بعضها البعض و بتعريـف متغير إضافي لمرة واحدة في بداية البرنامج وهو :

```
radianFactor= 2*pi/pointsInCycle
```

و بالتالي فإن الدوران (loop) المطبّق على كل نقطة يمكن كتابته كالتالي:

```
pointsAmp:=round(Amplitude*sin(radianFactor*n));
```

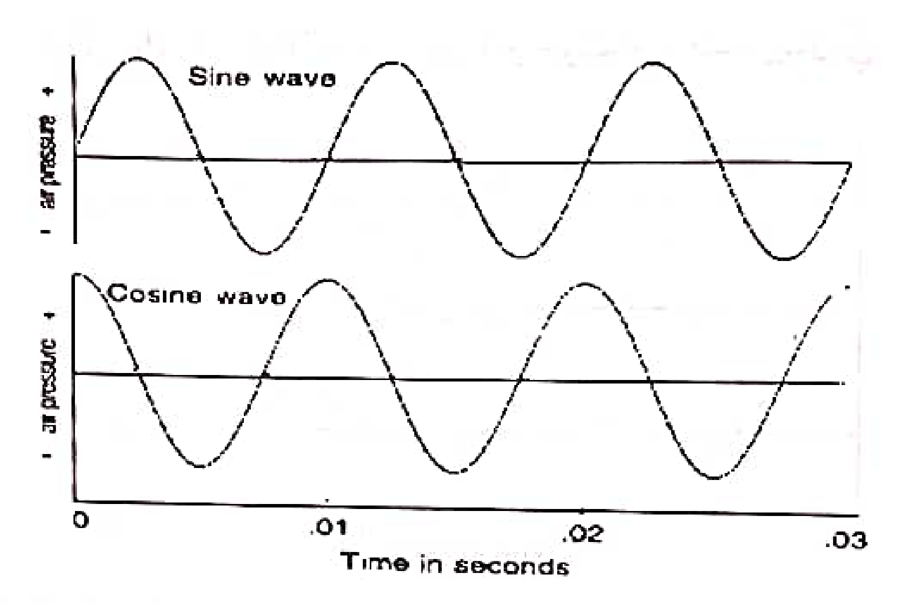
الموجات الجيب تمامية

عندما نأتي علـى تحليـل أصـوات الكـلام فإننـا نحتـاج إلى أن نـأخذ بالاعتبـار الموجات الجيب تمامية مثلما هي الموجات الجيبية. وجيب تمام الزاوية هو النسـبة بـين الضلع المجاور للزاوية القائمة (في المثلـث القـائم الزاويـة) علـى الوتـر وبـالرجوع إلى الشكل 10-1 يمكننا أن نلاحظ أن

y = a جا(θ)،

x = a جتا(θ).

وعندما تكون الزاوية T = صفر، فإن x هو نصف قطر الدائرة، a،وعندما تكـون T = 90 ° فإن x = صفر. الشكل10-6 يظهر أن الموجة الجيبية والموجة الجيب تماميـة، كلاهما يعتمد على نفس الزاوية T. لاحظ أن لهما نفس الشكل، ولكـن الموجـة الجيـب تمامية تتأخر خلف الموجة الجيبية بربع دورة، وهـذا يعـني الفـترة المقابلـة لـ T = 90 °. وكلاهما الموجة الجيبية والموجة الجيب تماميـة يسـميان الموجـات الجيـب والجيـب تمامية (sinusoidal waves) ولهما ما يسمى باختلاف الطور(phase).

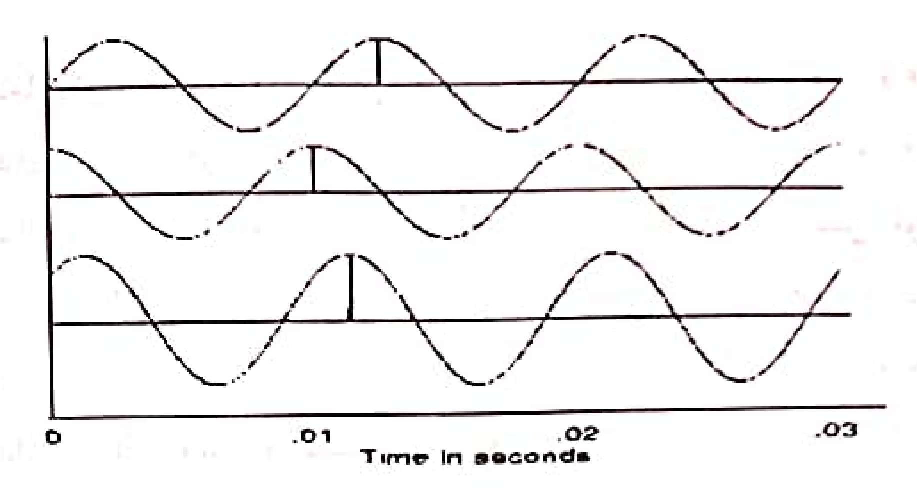


شكل 10-6 موجة جيبية و جيب تمامية متساويتان في التردد (100 هرتز).

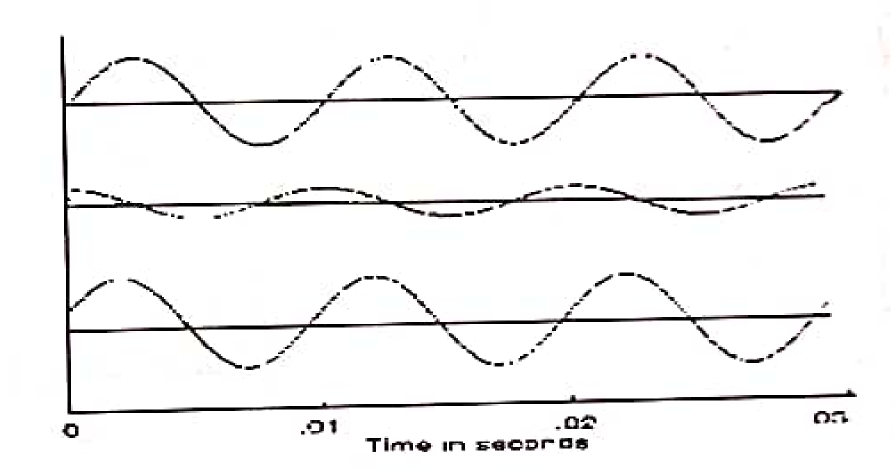
وكما رأينا في الفصول السابقة، فإن الاختلافات في ضغط الهـواء والـتي تعـود إلى موجات مختلفة يمكن إضافتها إلى بعضها البعـض.وعنـد إضافـة الموجـة الجيبيـة والموجـة الجيب تمامية إلى بعضها فإن موجة جيبية أخرى تنتج بارتفاع أعلى وبطول يكون متوسطا بين طول الموجتين معا كما هو موضح في الشكل10-7.

وإذا كانت الموجة الجيب تمامية أصغر من الموجة الجيبية، فإن طور(phase) الموجة الناتجة أقرب إلى طور الموجة الجيبية، وذلك يعني أنه أقرب إلى الصفر منـه إلى 90°، كمـا هو موضح في الشكل 10-8.

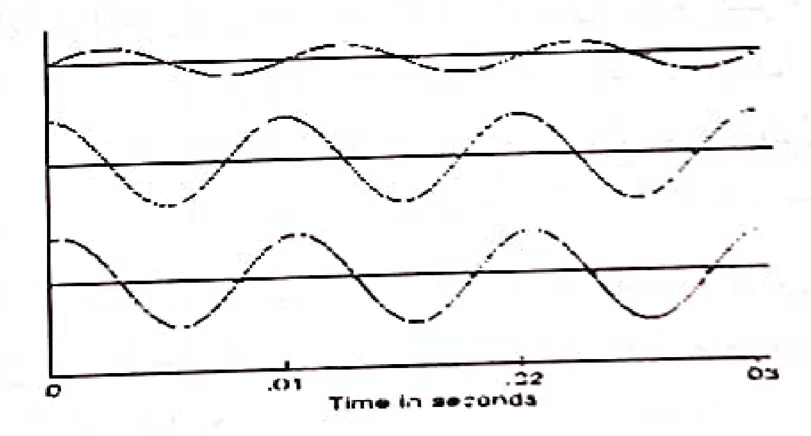
أما إذا كانت الموجة الجيب تمامية أكبر من الموجة الجيبية فإن الموجة الناتجـة عنـهما معا سوف يكون لها طور أقرب إلى الموجة الجيـب تماميـة يعـني أقـرب إلى 90° كمـا هـو موضح في الشكل (10،9).



شكل 10-7 إضافة موجة جيبية و جيبتمامية متساويتان في التردد.



شكل 10-8 موجة جيب صغيرة متحدة مع موجة جيب أكبر منها إلا أن كلتاهما متساويتان في التردد.



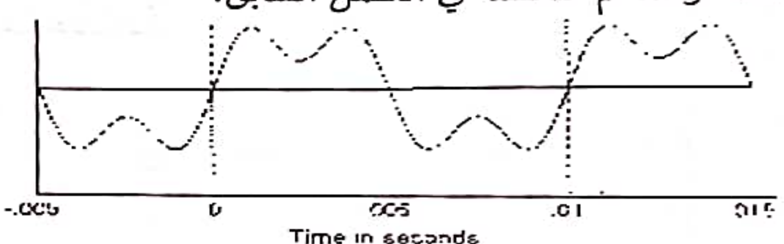
شكل 10-9 موجة جيب صغيرة متحدة مع موجة جيبتمام أكبر منها إلا أنهما متساويتان في التردد.

تحليــل فوريــر

كما رأينا في الفصل الرابع فإن الموجات المركبة يمكن وصفها بأنها حـاصل مجمـوع أعداد الموجات الجيب والجيب تمامية معا أو مركبات الموجات معا.(وفي هـذا الفصـل لم نأخذ أو لم نعتبر الموجات الجيب تمامية واكتفينا بالرجوع إلى كل المكونات كموجة جيبية، والآن يمكن أن نرى كيف أن طور الموجات يمكن أن يتغير، وسوف نأخذ بالاعتبـار كـلا من مكونات الموجة الجيبية والجيب تمامية معا ما أمكن ذلك).

خذ الموجة المركبة في الشـكل 10-10 كيـف لـك أن تحـدد عنـاصر ترددهـا أو مكونات ترددها ؟

الخطوة الأولى لهذه المسألة هي أن تقلل مقطع الموجة الـتي سـوف نقـوم بتحليلـها وذلك بإدخال النافذة، وكما تم مناقشته في الفصل السابق.



شكل 10-10 موجة مركبة ذات دورة واحدة تكرر حدوثها مرات لانهائية في الماضي، و سيتكرر حدوثها إلى ما لانهاية في المستقبل.

وللتبسيط، فإننا سنستخدم نافذة مستطيلة، و لهذا إننـا سـوف نـهتم بجـزء الموجـة الواقع بين الخطين المتقطعين فقط. ولمزيد من التبسيط، فقـد اخترنـا هـذه النـافذة بعنايـة بحيث تحتوي على فترة واحدة فقط. وسوف نفترض بأن هذه الفترة تمت إعادتـها إلى مـا لا نهاية في الماضي وســوف يتـم إعادتـها إلى مـا لانهايـة في المسـتقبل. والإجـراء الـذي سنستخدمه هو ما يعرف بـ

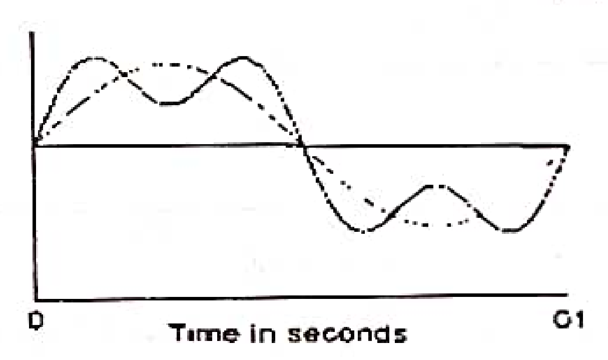
.(Discrete Fourier Transform DFT)

وبما أن النافذة لها زمن يساوي 100/ 1 من الثانيـة، يمكننـا أن نلاحـظ بـأن شـكل الموجة المكرر له تردد أساسي يساوي 100 هرتز. والخطوة الأولى للتحليل هـي أن نـرى

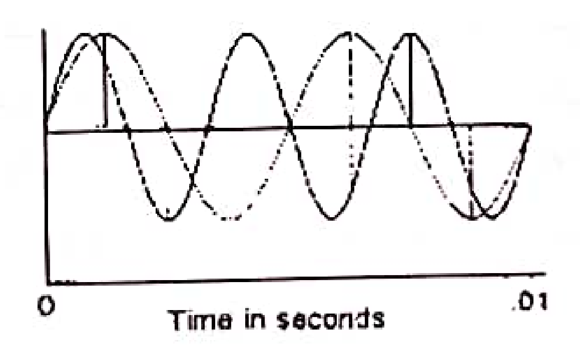
إلى أي مدى هذه الموجة ترتبط بشكل جيد مع موجة جيبية بتردد 100 هرتز و بسعة قياسية كما هو موضح في الشكل 10-11.

والارتباط بين الموجتين يعتبر مقياس إلى أي مدى تكون الموجتين متشابهتين في كل نقطة في الدورة الواحدة. ويتم حساب الارتباط بضرب كل نقطة على إحدى الموجتين بالنقطة المقابلة لها على الموجة الأخرى، و بعدها يتم جمع النواتج لعمليات الضرب. (والمصطلح الرياضي لهذا الرقم يعرف بالناتج النقطي(dot product)).

لو أردنا أن نحسب الارتباط بين موجتين جيبيتين بترددات مختلفة كما هو موضح في الشكل 10-12.فإننا نريد أن نأخذ السعة في كل نقطة على الموجتين، ولكن لأغراض التوضيح والعرض فإننا سنهتم فقط بالسعات في الأوقات المشار إليها بخطوط رأسية كما هو موضح بالشكل 10-12 وهذه السعات كما هي موضحة في جدول 10-1 مستخدمين مقياساً عشوائياً.



شكل 10-11 موجة ترددها 100 هرتز طبقت على الموجة في الشكل 10-10.



شكل 10-12 موجتان جيبيتان، إحداهما بتردد 200 هرتز (الخط الخفيف) و الأخرى بتردد 300 هرتز (الخط السميك).

وإذا أخذنا السّعات والأزمنة في أول ثلاثة أعمدة، فإننا الآن نحسب النواتج للسعتين الموضحتين في العمود الرابع للجدول. وفي كل صف، فإن العمود النهائي يظهر المجموع لهذه النواتج والنواتج السابقة. إن الارتباط يرتكز على مجموع هذه النواتج لكل نقطة على كلا الموجتين. ولأن هناك نواتج إيجابية بقدر النواتج السلبية، فإن المجموع يساوي صفر كمجموع نهائي على الدورة الواحدة للموجة الجيبية بتردد منخفض. (وواضح أنه يبقى صفراً عندما يجمع جمعا نهائيا على مدى دورتين كما هو واضح في هذا الشكل).

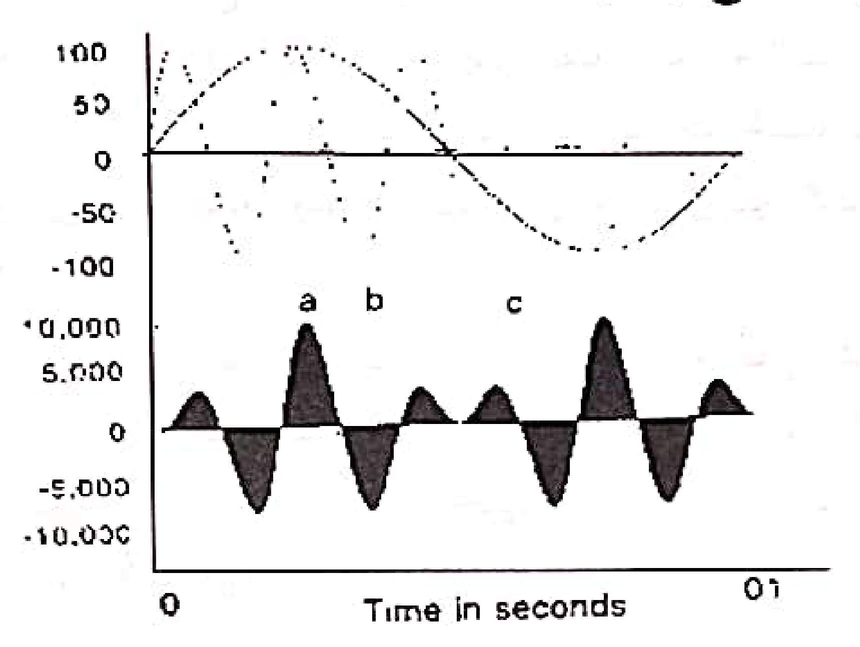
إن الارتباط بين أي موجتين جيبيتين بترددات مختلفة ستبقى دائما صفر. وكل ناتج إيجابي يطابق بناتج سلبي مساويا له كما هو موضح في الشكل 10-13.وفي الجزء الأعلى من الشكل 10-13 هناك موجتين جيبيتين، واحدة بتردد يساوي 100 هرتز (الخط الخفيف)، والأخرى بتردد يساوي 500 هرتز (الخط الغامق). وتم إضافة مقياس السعة لكي يحل على

جدول 10-1 السعات و حواصل الضرب و المجموع التراكمي لهذه الحواصل لعدد من النقاط في الموجات الموضحة في الشكل 10-12.

Time(s)	200 Hz Amplitude	300 Hz Amplitude	Product	Accumulating Sum of Products
0.00125	80	57	4560	4560
0.00250	0	−80	0	4560
0.00375	−80	57	−4560	0
0.00500	0	0	0	0
0.00625	80	−57	−4560	−4560
0.00750	0	80	0	−4560
0.00875	−80	−57	4560	0
0.01000	0	0	0	0

الجدول موضحاً تلك السعات المذكورة في النقاش السابق. والجزء الأسفل من الشكل يوضح بشكل بياني نتائج الضرب لكل نقطة على كل موجة بالنقطة المقابلة على الموجة الأخرى. و بناءً عليه،فإنه في الزمن a كلتا السعتين تساوي 100 على هذا المقياس، ولذا فإن نواتجها تساوي 10،000. وفي الزمن b الموجة ذات التردد 100 هرتز

لها سعة أقل بقليل، ولكن الموجة ذات التردد 500 هرتز لها اتساع أكثر سالبية، لـذا فـإن الناتج سيكون عدد سالب أكبر. وفي الزمن c فـإن كـلا الموجتـين سـيكون لهمـا سـعات صغيرة نسبياً ولهذا فالناتج موجب.

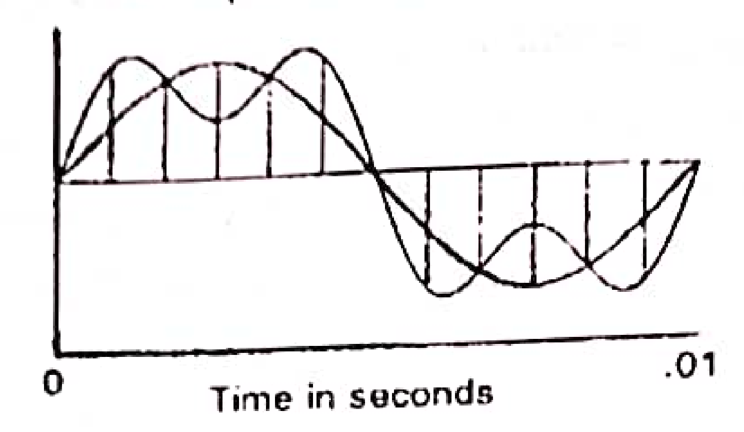


شكل 10-13 الجزء العلوي:موجتان جيبيتان، إحداهما بتردد 500 هرتز (الخط الخفيف)، و الأخرى بتردد 100 هرتز (الخط السميك). الجزء السفلي:الضرب التقاطعي لهاتين الموجتين.

في أي وقت يكون لأي من الموجتين اتساع يساوي صفر، فإن الناتج يساوي صفر ايضاً. وعند إضافة كل هذه النواتـج إلى بعضـها (أي إضافـة المنـاطق المظللـة في الشـكل السفلي إلى بعضها)، فإن النتيجة تساوي صفر. وبمصطلحات رياضية، إذا كان الارتبـاط يسـاوي صفـراً، فـهذا يعـني أن تلـك الموجتـين الجيبيتـين المختلفتـين في الـتردد همـا موجتـين متعامدتين(orthogonal). كما و يمكن دائماً اعتبارهما إسهام مستقل إضافي إلى موجة معقدة.

هذا هو الأساس في تحليل فورير، بما أن الموجات الجيبيـة متعـامدة فـإن الارتبـاط الوحيدة ما بين الموجة الجيبية والموجة المركبـة سـتكون مـن خـلال عنـاصر أو مكونـات الموجة المركبة ذات التردد المشابه للموجة الجيبية. واضعين ذلك في أذهاننا يمكتنـا الآن أن نعود إلى تحليل الموجة المركبة كمـا هـو موضـح في الشـكل 10-10 سـوف نحسـب أولاً الارتباط بين هذه الموجة والموجة ذات التردد 100 هرتز، آخذين بالاعتبـار نقاطـاً معينـة

كما هو موضح في الشكل 10-14، و لهذا فإننا نستطيع أن نبني جدولاً مشابها للجدول رقم 10-1. والقيم التي نحتاجها موضحة في الجدول رقم 10-2.



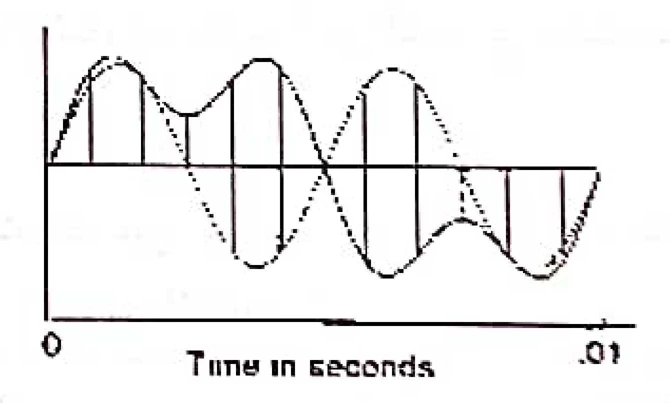
شكل 10-14 موجة مركبة ترددها الأساسي 100 هرتز و موجة جيب ترددها يساوي تردد الموجة المركبة، تظهران عدداً من النقاط التي ستستخدم في حساب الإرتباط.

جدول 10-2 السعات و المجموع التراكمي لحواصل الضرب لعدد من النقاط في الموجات الموضحة في الشكل 10-14.

Time(s)	Complex Amplitude	100 Hz Amplitude	Product	Accumulating Sum of Products
0.00083	60	30	1800	1800
0.00167.	52	52	2704	4504
0.00250	30	60	1800	6304
0.00333	52	52	2704	9008
0.00417	60	30	1800	10808
0.00500	0	0	0	10808
0.00583	−60	−30	1800	12608
0.00667	−52	−52	2704	15312
0.00750	−30	−60	1800	17112
0.00833	−52	−52	2704	19816
0.00917	−60	−30	1800	21616
0.01000	0	0	0	21616

وفي هذه المرة كل النواتج المتقاطعة إما أن تساوي صفر أو موجب، وحاصلها ابعد ما يكون عن الصفر. وكما هو واضح في كلا الشكل 10-14 والجدول 10-2، فإن الموجة الجيبية ذات التردد 100 هرتز والموجة المركبة مرتبطتان بشكل كبير. وإذا رسمنا مخططاً مشابهاً لشكل10-13 فإن كل المناطق المظللة سوف تكون أعلى من خط الصفر.

مهمتنا القادمة هي أن نرى كيف ترتبط الموجة المركبة مع التوافقيات الأخرى ذات التردد الأساسي 100 هرتز. و يوضح الشكل 10-15 والجدول 10-3 الجواب. أنه من الواضح أننا لو ضربنا كل نقطة على الموجة المركبة بكل نقطة إلى الموجية الجيبية ذات التردد 200 هرتز، فإنه لن يكون هناك أي ارتباط. وكل نقطة موجبة تطابق النقطة السالبة المساوية لها.

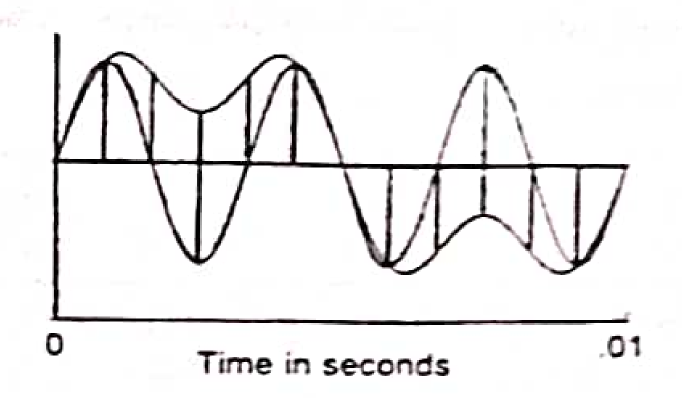


شكل 10-15 موجة مركبة ترددها الأساسي 100 هرتز و موجة جيب ترددها 200 هرتز، تظهران عدداً من النقاط التي ستستخدم في حساب العلاقة أو الإرتباط.

جدول 10-3 السعات و حواصل ضربها و المجموع التراكمي لحواصل الضرب لعدد من النقاط في الموجات الموضحة في الشكل 10-15.

Time(s)	Complex Amplitude	200 Hz Amplitude	Product	Accumulating Sum of Products
0.00083	60	52	3120	3120
0.00167	52	52	2704	5824
0.00250	30	0	0	5824
0.00333	52	−52	−2704	3120
0.00417	60	−52	−3120	0
0.00500	0	0	0	0
0.00583	−60	52	−3120	−3120
0.00667	−52	52	−2704	−5824
0.00750	−30	0	0	−5824
0.00833	−52	−52	2704	−3120
0.00917	−60	−52	3120	0
0.01000	0	0	0	0

وعند مقارنة الموجة المركبة مع الموجة ذات التردد 300 هرتز، فإن الوضع سيكون كما هو موضح بالشكل 10-16 و الجدول 10-4. هناك بعض النواتج السالبة ولكن هناك نواتج أكثر إيجابية. وإجمالا فإن الارتباط إيجابي ولكن ليس بقدر الموجة ذات التردد 100 هرتز. ومحصلة النواتج(cross products) ستكون نصف مجموع تلك النواتج للموجة ذات التردد 100 هرتز(وهذا صحيح، حيث أن الموجة المركبة التي تم تصنيعها بإضافة موجة جيبية ترددها 100 هرتز وموجة جيب أخرى سعتها نصف سعة موجة الجيب الأولى و ترددها 300 هرتز).



شكل 10–16 موجة مركبة ترددها الأساسي 100 هرتز و موجة جيب ترددها 300 هرتز، تظهران عدداً من النقاط التي ستستخدم في حساب العلاقة أو الإرتباط.

جدول 10–4 السعات، و حواصل الضرب و المعدل التراكمي لعدد من النقاط في الشكل 10-16.

Time(s)	Complex Amplitude	300 Hz Amplitude	Product	Accumulating Sum of Products
0.00083	60	60	3600	3600
0.00167	52	0	0	3600
0.00250	30	−60	−1800	1800
0.00333	52	0	0	1800
0.00417	60	60	3600	5400
0.0050	0	0	0	5400
0.0058	−60	−60	3600	9000
0.00667	−52	0	0	9000
0.0075	−30	60	−1800	7200
0.00833	−52	0	0	7200
0.00917	−60	−60	3600	10800
0.01000	0	0	0	10800

ومرة أخرى، لكي نرى بالضبط كيف يتم إيجاد حصيلة النواتج(cross product)، سوف نوضح كيفية عمل ذلك بواسطة الكمبيوتر(ومرة أخرى، فإنك

تستطيع، إذا أردت، أن تقفز عن الفقرتين التاليتين). وفي هذا المثال نأخذ جزء من برنامج يقوم بتخزين القيم الممثلة للموجة المركبة في مصفوفة متغيرة سوف نسميها complexWave بحجم n من القيم complexWave[n]. وهذه القيم قد تكون نتيجة تحويلات الأحادي (Analog) إلى الرقمي(digital) (A/D). والمجموعة المقابلة من القيم للموجة الجيبية سوف يتم تخزينها في مصفوفة اسمها sineWave بحجم n من القيم sineWave[n]. وقد رأينا كيف يمكن حساب القيم للموجة الجيبية. وعندما نحتاج لتخزين هذه القيم في المصفوفة sineWave[n]، فإننا سوف نكتب الجزء التالي من البرنامج:

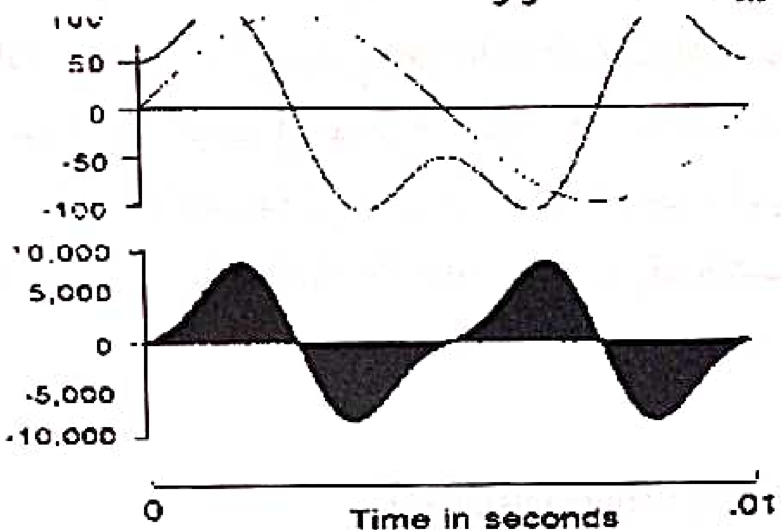
```
radianFactor:= 2.0*pi/pointsInCycle;
for n:= 1 to pointsInCycle do
sineWave[n]:=sin(n*radianFactor)*Amplitude;
```

وكل ما نحتاجه الآن هو جزء من برنامج سيأخذ كل نقطة في الموجة المركبة، ويضرب السعة لتلك النقطة بالقيمة المقابلة لتلك النقطة في الموجة الجيبية، ويضيف حاصل الضرب هذا إلى حاصل الضرب السابق كما فعلنا في جدول 10-4. مفترضين بأن كل المتغيرات تم تعريفها في أي مكان آخر، يمكننا كتابة الجزء التالي من برنامج:

```
accumulatingAmplitude := 0;    {begin by setting the amplitude to zero}
for n:= 1 to pointsInCycle do {now look at every point, and added its effect}
accumulatingAmplitude:=complexWave[n]*sineWave[n]+accumulatingA
mplitude
```

ولغاية الآن فلقد حصرنا دراستنا بمثال بسيط جداً، لم يكن يشتمل إلا على فترة واحدة للتحليل، ولم تكن الموجة المركبة تشتمل إلا على طور واحد كما هو في الموجة الجيبية ذات 100 هرتز. ولكن الموجة المركبة قد تبدأ بوقت مختلف، كما هو موضح في

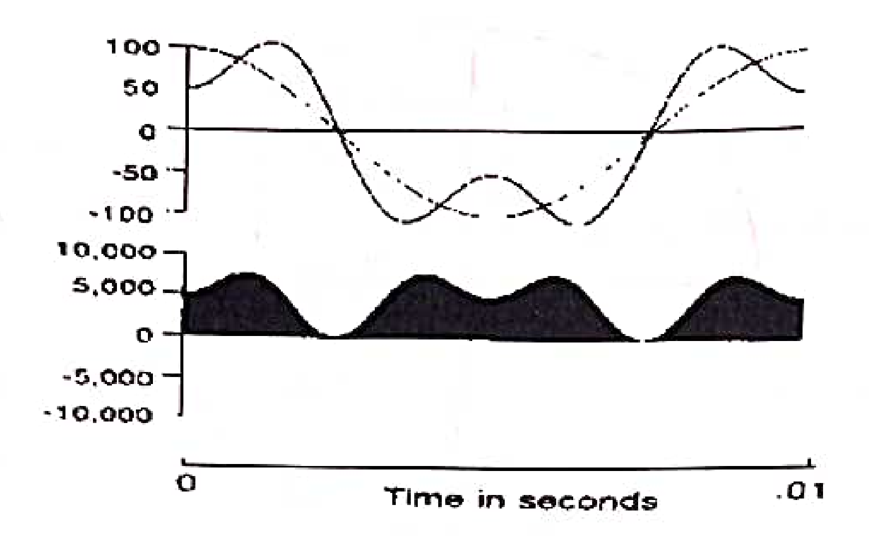
أعلى الشكل 10-17. وفي هذه الحالة فإن الموجة المركبة سوف يكون لهـا نفـس الشـكل للموجة المركبة في الشكل 10-10 والتي حللناها بأشكال متلاحقة ولكن لها طور مختلـف بالنسبة للموجة الجيبية ذات 100 هرتز.



شكل 10-17 الجزء العلوي: موجة مركبة لها نفس شكل الموجة في الشكل 10-10، إلا أنها مختلفة الطور بالنسبة لموجة الجيب المطبقة ذات 100 هرتز. الجزء السفلي: رسم بياني لنتيجة ضرب كل نقطة بالنقطة المقابلة على موجة الجيب ذات المائة هرتز.

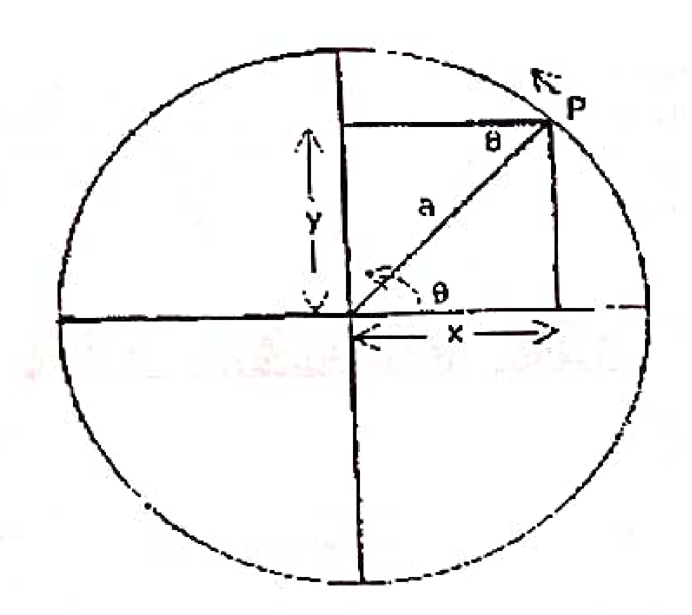
وكنتيجة لذلك، يمكننا أن نقول أنه لا يوجد هناك أي ارتباط بـين الموجتـين، كمـا ترى في أسفل الشكل 10-17، وهو تمثيل بيـاني لنتـائج الضـرب لكـل نقطـة في الموجـة المركبة بالنقطة المقابلة لها في الموجة ذات التردد (100) هرتـز. فلكـل نتيجـة موجبـة لهـذا الضرب، هناك نتيجة سالبة مقابلة لها. وعند جمع النتائج خلال دورة كاملة فـإن المحصلـة النهائية تساوي صفر.

ومع ذلك فإن هذا لا يعني بأن الموجة المركبة ليس لها عنصر بـ (100) هرتـز. إن لها ارتباط يساوي صفر مع الموجة الجيبية بنفس التردد، ولكن لها ارتباط عالي مـع موجـة جيب التمام ذات تردد 100 هرتز، كما يمكن ملاحظة ذلك على الفـور في الشـكل 10-18 وفي هذه الحالة فإن محصلة النواتج(cross products) هي نتائج موجبة.



شكل 10-18 الجزء العلوي : الموجة المركبة في الشكل 10-17 وموجة جيبتمام المطابقة ذات التردد 100 هرتز الجزء السفلي : رسم بياني لنتيجة ضرب كل نقطة في الموجة المركبة بالنقطة المقابلة على موجة الجيب ذات تردد 100 هرتز.

وبشكل عام، وبما أننا لا نعرف الأطوار النسبية للموجة المركبة والعناصر، فإننا سنأخذ بعين الاعتبار الارتباط لكلٍ من الموجة الجيبية و الموجة الجيب تمامية المقابلة لها. وإذا أردنا أن نعرف سعة عنصر ما في الموجة المركبة، فإنه يتوجب علينا وبطريقة ما جمع السعات لعناصر الموجة الجيبية والجيب تمامية. وبالرجوع إلى تعريفنا للموجات الجيبية والجيب تمامية وفقاً لنقطة تدور حول الدائرة، يمكن أن نعرف كيفية عمل ذلك. وكما هو موضح بالشكل 10-19، إذا كانت السعة لنقطة ما على موجة جيبية هي x، والسعة لنقطة ما على موجة جيب تمامية هي y، فإن السعة للنقطة على الموجة الجيبية الجيبتمامية (sinusoidal) هي a، وطبقا لقانون فيثاغورس فإن $a = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ أو $(x^2 + y^2)^{1/2}$



شكل10–19 العلاقة بين السعة y لنقطة على موجة جيب، والنقطة x، على موجة جيبتمام مساوية لها في التردد والنقطة a على موجة المنحنى الجيبي الناتجة عن دمج عناصر الجيب والجيبتمام.

$$a = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (x^2 + y^2)^{1/2}$$

ونريد عادةً التعبير عن السعات النسبية لعناصر الموجة المركبة بـ dB(الدسبل) بالنسبة إلى سعة عشوائية. و لنفترض أن لهذه السعة العشوائية قيمة تساوي وحدة واحدة. ولقد رأينا سابقا في الفصل السادس بأن الفرق الدسيبلّي بين صوتين يعادل عشرين ضعف اللوغاريتم الطبيعي لنسبة السعة بين صوتين. وإذا كان الصوت المرجعي له سعة تساوي واحد، فإن ذلك سيكون

$20\log_{10} a$. حيث أن $a = (x^2 + y^2)^{1/2}$، والسعة بـ dB (الدسبل) المتناسب مع الوحدة الواحدة هي $20\log_{10}((x^2 + y^2)^{1/2})$ يمكن تبسيطه إلى $10\log_{10}(x^2 + y^2)$

وهذه السعة ستكون عدداً عشوائياً. ويمكن القول بأن هذه هي السعة بـdB (الدسبل) على أساس أن السعة للعناصر الأخرى والمحسوبة بنفس الطريقة ستكون بـdB بالنسبة إلى نفس الأساس العشوائي. ولهذا فإنه بإمكاننا تقييم السعات النسبية بـdB لعناصر مختلفة للموجة المركبة. وفي العادة يؤخذ العنصر ذو أقصى سعة على أنه صفر، أما العناصر الأخرى فتؤخذ على أنها أقل من ذلك. والآن سوف نتوسع بجزء البرنامج الذي يحسب سعات عناصر الموجة الجيبية الجيب تمامية(sinusoidal) ونقول :-

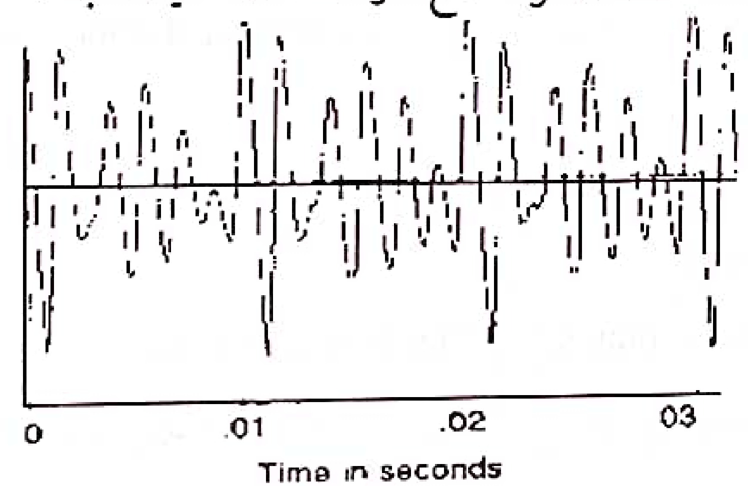
```
sineAmplitude:= 0;  {in this version there are two intermediate}
cosAmplitude:= 0; {variables used for accumulating sums}
radianFactor:= 2.0*pi/pointsInCycle;
  for n := 1 to pointsInCycle do    {for each point, calculate and sum
cross products}
      begin
sineAmplitude:=complexWave[n]*sin(n*radianFactor)+sineAmplitude;
cosAmplitude:=complexWave[n]*cos(n*radianFactor)+cosAmplitude;
      end;
{Now get the sum of the squares of these, and calculate 10 times the
log of this numbers}
 componentAmplitude:= 10*log (sineAmplitude*sineAmplitude
                                  +cosAmplitude*cosAmplitude);
```

و لقد قمنا، حتى الآن، بتحليل موجة بسيطة إلى حد ما، وبعنصرين فقط. (يوجد – نظريا- عدد لانهائي من العناصر، ولكن في الموجة المركبة فإننا نحلل اثنين منها فقط و بأي سعة كانت). وعلاوة على ذلك، ففي الفترة التي تم تحليلها، كان هناك فترة واحدة بالضبط لأحد العنصرين، و ثلاث فترات بالضبط أيضاً للعنصر الآخر. ولكن وبشكل عام، عندما نقوم بتحليل الكلام فإن الوضع لن يكون بهذه البساطة.

وفي هذا النوع من التحليل سوف نأخذ بعين الاعتبار تحليل فورير المنفصل (DFT)، و نبحث عن عناصر في الموجة المركبة بحيث تكون مضاعفات التردد الأساسي المحدد بطول النافذة. وفي المثال السابق كان طول النافذة يساوي100/ 1 من الثانية، ولهذا سنبحث عن عناصر تكون مضاعفات الـ 100 هرتز. و سيكون هذا مناسباً، حيث أن

العناصر في الحقيقة كانت تساوي 100هرتز و 300 هرتز. ولكن عندما لا نعلم أي شيء عن الإشارة المراد تحليلها، فإنه لا يوجد سبب لأن نتوقع وجود علاقة ملائمة مثل تلك العلاقة. وقد لا يكون هناك توافق جيد بين تحليل العناصر، التي تعرف بمضاعفات التردد المحدد بطول النافذة والتركيب التوافقي للإشارة، والتي ستحدد بأي تردد أساسي للموجة التي هي قيد الدراسة.

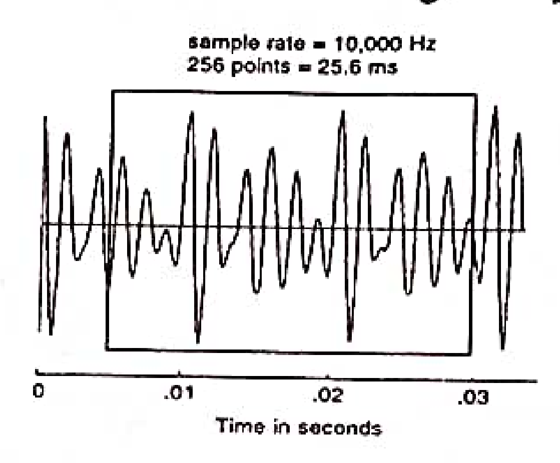
ولنأخذ تحليل موجة الكلام الموضحة في الشكل 10-20. نحن لا نعرف التردد الأساسي لهذه الموجة، وببساطة يجب علينا أن نأخذ قطعة عشوائية ونقوم بتحليلها. وطول هذه النافذة سيحدد التردد لكل العناصر في التحليل، وبذلك سوف تكون جميعها نغمات توافقية (harmonics) متوافقة مع الترددات الأساسية المقابلة.



شكل 10-20 موجة مركبة جاهزة للتحليل.

وسنفترض أنه يتوفر لدينا تمثيل رقمي لشكل الموجة المأخوذة كعينة بتردد يساوي10،000 هرتز. وكما رأينا في الفصل السابق، إذا كان المعدل العيني يساوي 10،000 هرتز، فإن أعلى تردد يمكن تمثيله يكون نصف ذلك، أي أنه يساوي 5000 هرتز. وسنأخذ بالاعتبار نافذة عشوائية ذات 256 نقطة لهذه الموجة، كما هو موضح بالشكل 10-21. وفي هذا المعدل العيني، فإن 256 نقطة تقابل نافذة لها طول يساوي 25.6ملثانية. وإذا كانت فترة واحدة تساوي25.6ملثانية فإن التردد (وهو عدد الفترات في الثانية) يساوي 1000/ 25.6= 39 هرتز. وبمعنى آخر، فإننا نستطيع القول أن التردد يساوي المعدّل العيني/ طول النافذة، و في مثالنا فهو 1000/ 25.6=39 هرتز.

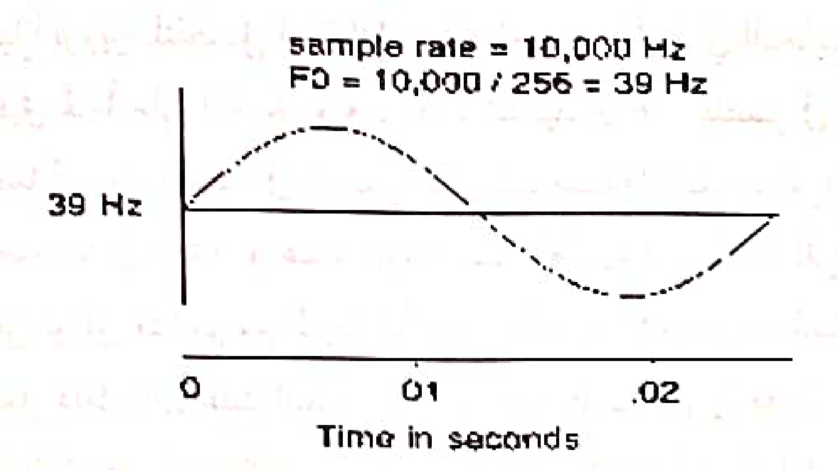
وفي تحليل فورير المنفصل (DFT) فإن العنصر الأول في التحليل هو الموجة الجيبية التي تنطبق تماماً على النافذة. ويجب علينا التأكيد أن هذا عنصر في التحليل، وأن ذلك يختلف عما أخذناه كعنصر في الفصل السابق. فسابقا كنا ندرس الموجة ككل، وليس كجزء صغيرة في نافذة. و عندما درسنا قطعاً أطول، فإنه يمكننا القول بأن العناصر كانت عبارة عن توافق متناغم مع التردد الأساسي المعرف بمعدل الذبذبات في الأوتار الصوتية. ولعمل ذلك كان علينا التظاهر بأن كل فترة كانت تكراراً مطابق تماما للفترات المجاورة. وفي الحقيقة فقد كنا نتظاهر بأن كل فترة كانت شيئاً يمكن التعامل معه كما لو أنه تكرر في الماضي وسيتكرر في المستقبل.



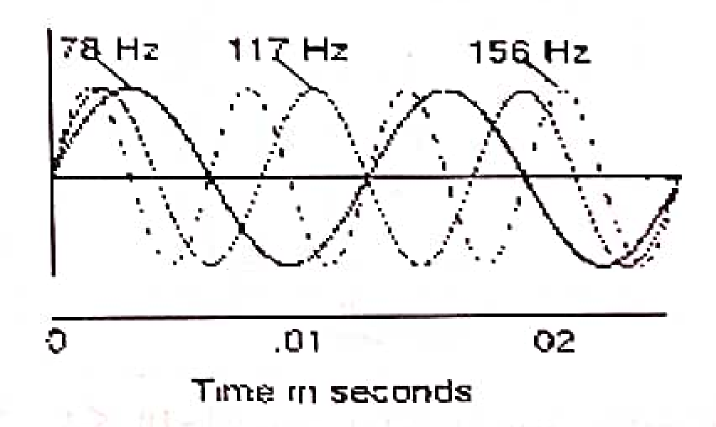
شكل10–21 موجة مركبة بعد تطبيق النافذة عليها.

وعندما نقوم بتحليل فورير المنفصل، فإننا سنكون بوضع مشابه، نأخذ موجة الجيب الجيبتمامية (sinusoidal)(بعنصريها الجيب و جيب التمام) والتي ستنطبق تماما على النافذة مثلما هو التردد الأساسي للتحليل.و في المثال الذي نحن بصدد دراسته،فهو عبارة عن موجة ترددها 39 هرتز كما هو موضح في الشكل10–22.

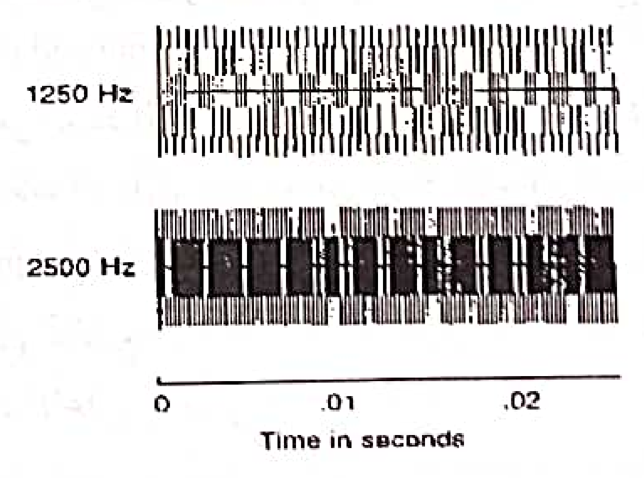
والعناصر الثانية والثالثة والرابعة سترتبط بالموجة المركبة كما هو موضح في الشكل10–23. وكلها بالطبع مضاعفات لـ 39 هرتز. و يوضح الشكل10–24. بعض العناصر ذات التردد الأعلى في تحليل فورير المنفصل (DFT). إن هذه الترددات العليا معرفة بنقاط اقل لكل دورة. و التردد الأعلى له نقطة موجبة واحدة ونقطة سالبة واحدة في كل دورة (وهو غير موضح بالشكل 10–24، حيث أنه سيظهر كمنطقة سوداء داكنة في هذا المقياس).



شكل10-22 أول موجة سيتم ربطها بتحليل DFT مع ذلك الجزء من الموجة المركبة في النافذة.



شكل 10-23 العنصر الأول والثاني والثالث المستعملة في تحليل DFT.



شكل 10-24 بعض عناصر الترددات العليا في تحليل DFT.

ولقد لاحظنا أن التردد الأعلى يمكن أن يظهر في الموجة التي نقوم بتحليلها، و التردد (Nyquist) يساوي 5000 هرتز. إذا كانت الفترة الفاصلة بين كل تردد من ترددات العنصر و التردد التالي يساوي 39 هرتز، فإن العدد الكلي لترددات العناصر المحتملة يساوي 5000/ 39 = 128. و هي نصف طول النافذة، كما يظهر عندما نلخص كل هذه العلاقات على شكل مجموعة من العبارات في برنامج حاسوب (في لغة باسكال يستخدم تعبير "Div" للتعبير عن القسمة للأعداد الصحيحة "Divided by"):

```
Nyquist Frequency := Sample Rate div 2;
Interval Between Components := Sample Rate div window Length;
Number Of Components := Nyquist Frequency div interval Between Components;
{or}
number Of Components := (Sample Rate div 2) div (Sample Rate div window Length);
```

وعند حساب تحويل فورير المنفصل (DFT) فإنه يتوجب علينا تحديد الارتباط بين كل عنصر من العناصر المحتملة و جزء الموجة الموجود في النافذة. وكل ارتباط يحدد بالطريقة الموضحة أعلاه بالنسبة لتردد العنصر الأول. و نقوم بحساب الموجة الجيبية والموجة الجيب تمامية المطابقة لكل تردد، ثم نحدد حصيلة النواتج لكل نقطة، ثم نجمع هذه النواتج، ونحولها إلى الفرق الديسيبلي بالنسبة إلى موجة عشوائية. و هذه الأعداد تشكل طيف الموجة وفقاً للسعات النسبية لعناصر موجات الجيب و الجيبتمامية (sinusoidal).

وكما رأينا، فإن الفترات بين العناصر المتتابعة تعتمد على التردد الأساسي للموجة في النافذة والتي بدورها تعتمد على طول النافذة والمعدل العيني. وغالبا فإن المعدل العيني يثبت بواسطة برمجيات (hardware) والمستخدَم في تحويل الأحادي إلى الرقمي الثنائي، وبذلك لا نستطيع التعامل إلا مع طول النافذة. وإذا أردنا أخذ فترات أصغر بين العناصر، فإنه يتوجب أن نستخدم نافذة أطول. ونافذة ذات 500 نقطة تعطينا

فترة تردد تساوي 20 هرتز (وعند معدل عيني 10،000 هرتز)، أما النافذة ذات 1000 نقطة فتعطينا فترة تردد تساوي 10 هرتز. وبالرغم من أن نافذة ذات 1000 نقطة ستعطي ناتج تردد أدق، إلا أنها ستأخذ فترة زمنية تساوي 100 ملثانية، التي قد تكون طويلة جدا لاختبار ظاهرة متغيرة بشكل متسارع. وإذا كان من المحتمل تغيير المعدل العيني فإنه يمكن أن نحصل على تحديد أدق للتردد دون تطويل الفترة الزمنية للنافذة. وكما رأينا فإن العلاقة هي : فترة التردد = المعدل العيني / عدد النقاط في النافذة. ولهذا فإننا سنحصل على فترة تردد أقل بتقليل المعدل العيني. والمأخذ الوحيدة هنا بأن ذلك سيقوم أيضا بتقليل أعلى تردد يمكن تحديده في الطيف.

والجدول 10-5 يوضح تلك العلاقات. حيث أن الدمج الدقيق بين المعدل العيني و طول النافذة يكون أكثر ملاءمة بالاعتماد على الظروف المحيطة. و حينما نبحث في صوائت طويلة، لا يهمنا تردداتها العليا،بحيث يجوز لنا أن نستخدم معدلاً عينيّاً بطول 10،000 هرتز و نافذة بطول 1،024 نقطة. و عندما نبحث في انفجار أصوات الوقت حيث أن الترددات العليا هي الأهم، فإن اختيار المعدل العيني 20،000 هرتز و طول النافذة 128 نقطة سيكون الاختيار الأفضل.

جدول 10-5 العلاقة بين المعدل العيني، وطول النافذة، والترددات.

Sample Rate	Window Duration		Interval between Components	Highest Frequency
(Hz)	(Points)	(Ms)	(Hz)	(Hz)
20,000	1024	51.2	19.53	10,000
	512	25.6	39.06	
	256	12.8	78.12	
	128	6.4	156.24	
10,000	1024	102.4	9.76	5,000
	512	51.2	19.53	
	256	25.6	39.06	
	128	12.8	78.12	
5,000	1024	204.8	4.88	2,500
	512	102.4	9.76	
	256	51.2	19.53	
	128	25.6	39.06	

والجدول 10-5 يجعل ذلك واضحاً، فلمعدل عيني معطى، إذا أردنا حساب التردد بدقة أكثر، فذلك يتطلب نقاط أكثر في النافذة (ومنه فإن الزمن سيكون أقل دقة). وبالنسبة لعدد نقاط معطى في النافذة، فإذا أردنا حساب التردد بدقة أكثر، فإن ذلك يتطلب معدلا عينيا أقل (ومنه فإن أعلى تردد محسوب يكون أقل. والمبدأ العام بقول : بأنك لا تستطيع أن تخدع الطبيعة الأم.

ويعتبر تحليل فورير البسيط بطيء نسبيا عند حسابه بواسطة الحاسوب وهناك حسابات مشابهة، تعرف بتحليل فورير السريع (FFT) وهي أسرع بكثير، ولكنها تستخدم فقط نوافذ ذات طول مساوياً لإحدى قوى الـ 2 (ومثال ذلك نقاط تساوي 24، 64، 128، 256، أو 1024). وتكمن أهمية تحليل فورير السريع للنوافذ ذات الأطوال المساوية لإحدى قوى الـ 2 بأنها وضحت تكنولوجيا الكلام و أبحاث الكلام خلال العشرين سنة الماضية.

وأخيرا، يمكن أن نجمل القول بأن المادة التي قدمت في هذا الفصل والحصول منها على فهم شمولي أكثر لتحليل فورير المنفصل(DFT) إذا أخذنا بالاعتبار أجزاء أكبر قليلا من البرنامج لهذا الغرض والموضح أدناه. وسوف نفترض بأن الموجة أخذت كعينة وقرئت في مصفوفة ذات قيم صحيحة.complexWave[n].

```
Program DFT;
Const
      Sample Rate = 10000;          {These two numbers would normally be
menu selectable, or
      PointsIn Window = 256;        provided by some other part of the total
program}
      Var
       Number Of Frequency Components, component, n: integer;
       Radian Factor, sine Amplitude, cosAmplitude: real;
       Complex Wave: array [1..1000] of integer;
       Component Amplitude: array [1..128] of real;
```

```
begin
  number Of Frequency Components := PointsIn Window div 2;
    for component := 1 to number Of Frequency Components do
    {Calculate the correlation for each possible component frequency}
    begin
       {make the new "radian Factor" for each component}
       radian Factor := component*2.0*pi/Points In Window;
       sine Amplitude:=0;     {zero the variables}
       cosAmplitude:=0;      {used for accumulating sums}
       for n:=  1 to number Of  Points do   {calculate & sum the cross
product
      for each point}
          begin
     sine   Amplitude:=  complex   Wave[n]*sin(n*radian   Factor)+sine
Amplitude;
     cosAmplitude:=       complex      Wave[n]*cos(n*radian       Factor)
+cosAmplitude;
          end;
      {express  each   component amplitude in dB = 10*log to base 10 of the
power spectrum}
      componentAmplitude[component]:=10*log10(sineAmplitude^2+cosA
mplitude^2);
      end;
      end.
```

الفصل الحادي عشر

المرشحات الرقمية وتحليل LPC

الفصل الحادي عشر

المرشحات الرقمية وتحليل LPC

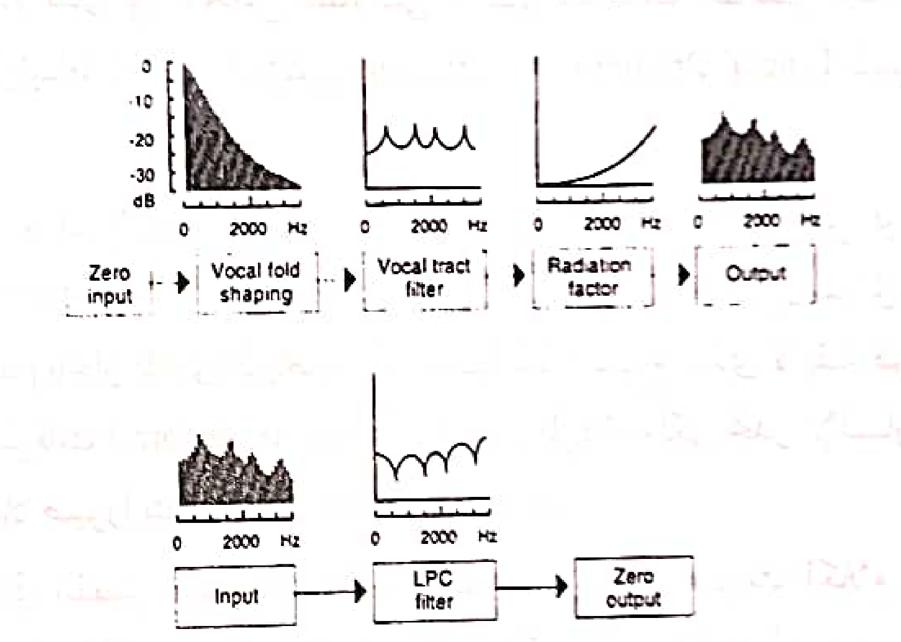
إن معادلة فورير Fourier ليست الطريقة الوحيدة لتحديد طيف الصّوت، هناك طريقة تستخدم كثيرا في التحليل الصوتي لأصوات اللغة تتضمن تحديد ما يسمّى بمعامل الارتباط الخطي التنبئي Linear Predictor coefficients للموجة الصّوتية.

وهذا النهج يُعرف باسم تحليل LPC و هو أكثر تعقيدا بقليل من تحليل فورير Fourier بطريقة Discrete Fourier Transform التي وصفناها في الفصل السابق، غير أنه من الممكن أن نقدّم بإيجاز المبادئ الرياضية الأساسية لهذا النهج الذي لا يفترض أي معرفة عن جبر المصفوفات (matrix algebra) أو الأعداد المركبة، ولكن تجدر الإشارة إلى أن الأمر يتطلب عملا صبورا يتضمن حلّ معادلات أوليّة مملّة.

كما شاهدنا في الفصل السابع، نستطيع وصف العديد من أصوات الكلام وفق نظرية مرشح المصدر(Source-filter)، الملخّصة في الشكل 7-7، والتي أعيد رسمها هنا في النصف العلوي من شكل 11-1. وأضفنا إلى الشكل الأصلي 7-7، ما تخيلناه بأننا بدأنا من مدخل الصفر، ثم اتخذ شكلا يناظر شكل مصدر القناة الصوتية، مجموعة من النبضات ذات شكل معين. وبالطبع، لو كان هنالك مدخل صفر وليس هناك مولد داخل النظام، فلن يكون هناك مخرج. output أن فكرة مدخل الصفر هي طريقة مناسبة للتأكيد على أن نبضات الأوتار الصوّتية جزء من نظام الإنتاج. ومن هناك يستمر الرسم كما في السابق، مع ترشيح الصّوت الناتج عن المزمار بفعل عمل الأوتار الصّوتية، وبذلك يصبح مصدرا للصّوت منطلق (radiating out) من الشفتين.

إن الصوت الذي نتج مثلناه بطيف يظهر على يمين الشكل 11-1

إن الفكرة الأساسية لتحليل LPC موضحة في الجزء الأسفل من الشكل، ويمكن اعتبارها عمليّة معكوسة لإنتاج الكلام. وطبقا لمخطط التحليل هذا، المدخل هنا موجة صوتية (مثلت هنا بالطيف الخاص بها)، مُررت من خلال مرشح معاكس لهذا الطيف وسيتتج المدخل مخرجا أقرب ما يكون إلى الصفر. وهناك فرق رئيس بين النظامين، ناهيك عن الحقيقة التي مفادها أن الأول تقرير عن توليف الكلام والثاني نظام تحليل الكلام، وطبقا لنهج LPC، دمجت خصائص الطيف المميزة للمصدر المزماري radiation بإشعاع الشفتين Lip radiation في مرشح واحد كذلك الذي يمثل خصائص القناة الصوتية، وعليه، فإن



شكل 11-1 صورة مرشح المصدر لتوليف الكلام بالمقارنة مع تحليل LPC.

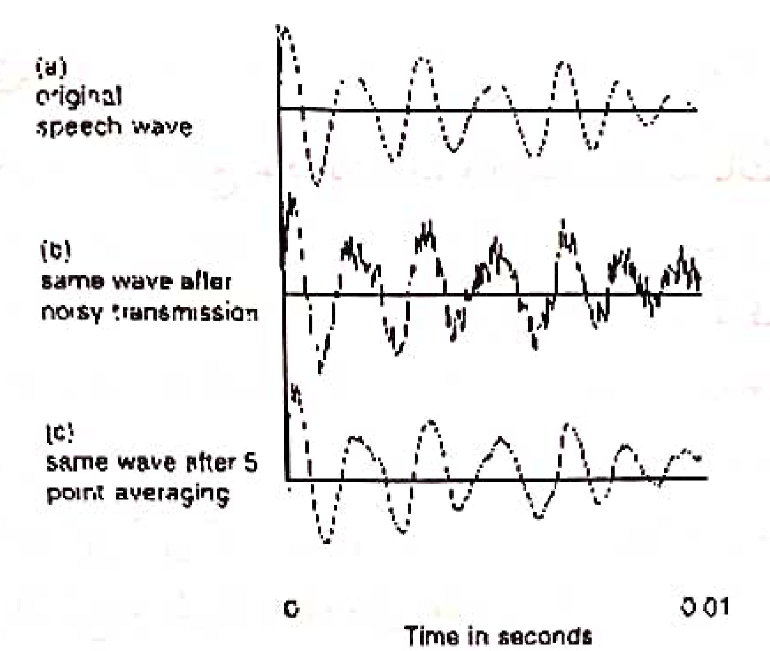
مرشح LPC لا يمثل تماما القناة الصوتية. إلا أن له - على كل حال- الشكل العام نفسه. ووجه الشبه المهم بين النظامين أنه في كلتا الحالتين يتركز العمل الرئيسي على ترشيح نمط الموجة ولذلك سنبدأ هذا الفصل المخصص لتحليل LPC بدراسة المرشحات من وجهة نظر رقميّة.

المرشحات الرقمية

يعبر عن خصائص المرشح عادة بعبارات مألوفة في البصمات الصوتية، ففي الفصلين الخامس والسادس، حينما تطرقّنا إلي موضوع المرشحات، و قد قمنا بذلك عندما تعرّضنا لموضوع Input wave ثم قدّمنا وصفا للتردد المركزي وإلى عرض النطاق الترددي bandwidth للطيف الذي يمكن للمرشح أن يسمح بتمريره، إلا أن في معالجة الكلام رقمياً، فإن الأمر لا يقتصر على إدخال موجة واحدة إلى المرشح، بل مجموعة من العينات التي تمثل السعات في لحظات زمنية معينة. و لهذا يتعين علينا دراسة خصائص المرشح و طريقة عمله على هذه النقاط.

ومثال نسوقه على هذا التوصيف مرشح معدّل التحرّك Moving Average Filter وهو عبارة عن مرشح تُستبدل فيه كل نقطة بمعدّل تحركها و بمعدّل تحرك النقاط المجاورة لها. تأمل الموجة في الشكل 11-2 a، إذا بثَ هذا الصوت من خلال قنال صاخب، كخط تلفون رديء، سيزداد فيه الضجيج العشوائي random noise، كما هو مبين في الشكل 11-2 b. نستطيع إزالة بعض الضجيج بتمرير الموجة من خلال مرشح يستبدل كل نقطة بمتوسط النقطة ذاتها وعدد من النقاط على كلا الجانبين، أي أخذ معدل التحرك. وبهذه الطريقة نستطيع استرجاع موجة شبيهة بالموجة الأصلية، ومع ذلك فسيبقى بعض الشوائب، كما هو موضح في الشكل 11-2 c.

ويوضح الشكل11-3 المزيد من التفصيلات التي توضح النقاط في جزء من الموجة ذات الضجيج في الشكل 11-2 b، وكذلك تلك النقاط بعد تمريرها من خلال مرشح يتم من خلال استبدال كل نقطة بمتوسط تلك النقطة والنقطتين اللتين من قبلها و النقطتين اللتين بعدها. وفي هذا المثال بالذات، نولي عنايتنا بخمس نقاط، وبدلا من أن نأخذ معدّل التحرك لخمس نقاط، كان بإمكاننا أن نأخذ عددا أقل أو أكبر في الحسبان، وبذلك نحصل على نتيجة أفضل لموجة المدخل Input wave.

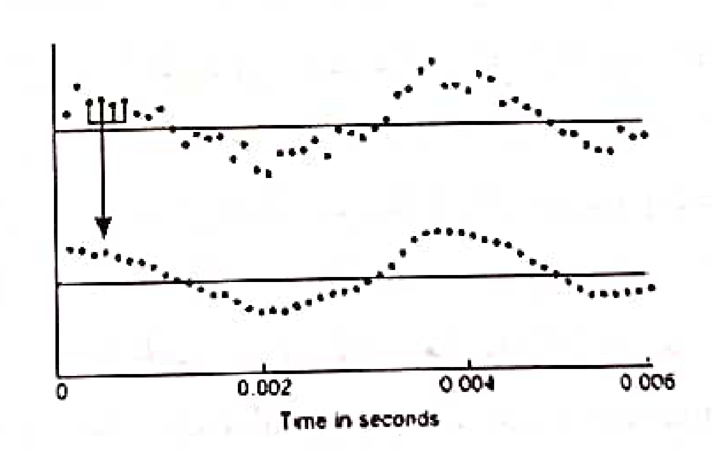


شكل 11-2 (أ) جزء من موجة كلام

(أ) الموجة نفسها بعد إمرارها من خلال قنال مشوش للبث

(ب) الموجة نفسها بعد إمرارها من خلال قنال مشوش للبث

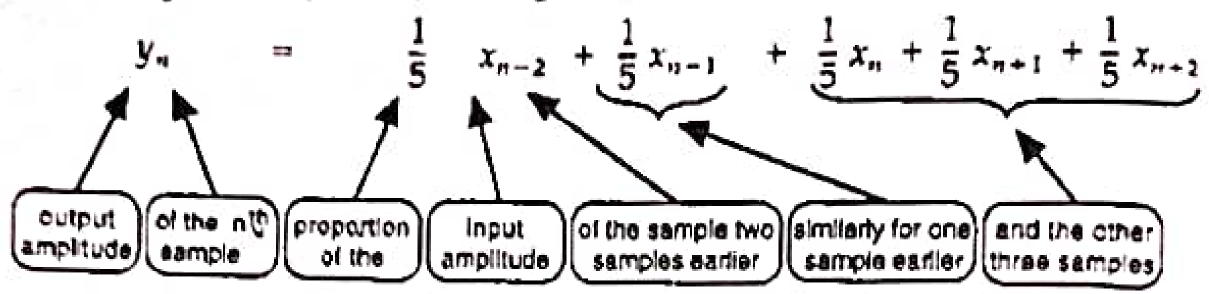
(ج) الموجة المشوشة بعد إمرارها من خلال مرشح بحيث تم استبدال كل نقطة بمعدّل النقطة ذاتها والنقطتين المجاورتين قبلها وبعدها.



شكل 11-3 أجزاء من الأجزاء الدنيا لأشكال الموجات في الشكل11-2، موضحا بمزيد من التفصيل كيف أن كل نقطة في الموجة السّلسة هي بمثابة معدّل خمس نقاط في الموجة المشوشة.

من الواضح إنه لعمل مرشح من هذا النوع فإننا بكل بساطة لجمع سعات النقاط ثم نقسم على عدد النقاط في المجموع. ولنعبر عن هذا بالصيغة التالية، ويمكننا القول بأن التي نعني بها سعة المخرج في زمن معين n، هي معدّل المدخل x في زمن n، وعدد من النقاط الأولى والتالية، وفي مثالنا، النقطتان قبل الزمن n والنقطتان بعد الزمن n.

ونستطيع التعبير عن هذه الفكرة على شكل معادلة إذا ما عرفنا سعة أي نقطة y_n.



ودون التعليق الإضافي، المعادلة هي :

$$y_n = \frac{1}{5} x_{n-2} + \frac{1}{5} x_{n-1} + \frac{1}{5} x_n + \frac{1}{5} x_{n+1} + \frac{1}{5} x_{n+2}$$

وفي هذا المرشح، أسهمت كل نقطة بالتساوي في معدّل التحرك، إلاّ أن هذه الطريقة ليست الوحيدة التي يمكننا جعل المخرج شكلا مقبولا من أشكال المدخل، كان بإمكاننا أن نقرر جعل المخرج في زمن معين يعتمد بشكل رئيسي على سعة النقطة في ذلك الزمن، وأقل اعتمادا على سعات النقاط البعيدة، بدلا من أن تكون كلها 1/5 وقد تكون معادلتنا كالتالي :

$$y_n = \frac{1}{10} x_{n-2} + \frac{1}{5} x_{n-1} + \frac{2}{5} x_n + \frac{1}{5} x_{n+1} + \frac{1}{10} x_{n+2}$$

وبدلا من ذلك، كان بإمكاننا أن نأخذ بالحسبان عددا أكبر من النقاط وأوزان متباينة كما هو في المعادلة التالية التي تكون فيها النقاط قبل النقطة قيد الدرس راجحة الكفّة على النقاط التي بعدها :

$$y_n = \frac{1}{3} x_{n-3} + \frac{1}{5} x_{n-2} + \frac{1}{7} x_{n-1} + \frac{1}{9} x_n + \frac{1}{12} x_{n+1} + \frac{1}{14} x_{n+2} + \frac{1}{16} x_{n+3}$$

لاحظ أيضا أنه لا يوجد سبب لإضافة الأوزان المعطاة لكل نقطة إلى الرقم واحد.

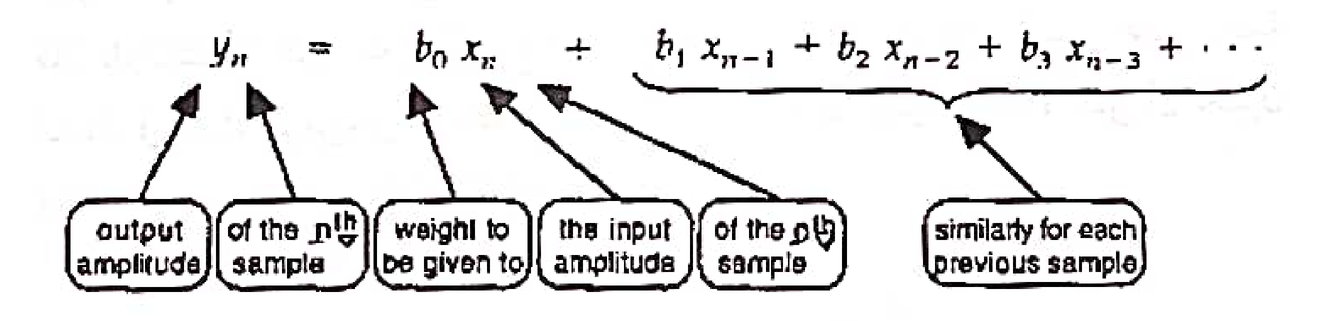
أنظر مرشحا فيه :

$$y_n = 2x_{n-1} + 3x_n + 2x_{n+1}$$

كل هذا يتضمن أن المخرج ليس جمعاً موزوناً لنقاط معينة من نقاط المدخل بل يعني أنه مكبّر، بحيث أن الوسط الحسابي للمخرج mean output له قيمة مطلقة أعظم من الوسط الحسابي للمدخل mean output، لاحظ أيضا أنه إذا أردنا أن نصف مرشحا بعبارات أعم، نكتب ما يلي:

$y_n = ax_{n-1} + bx_n + ...$ حيث a و b تُقابل الأوزان في المعادلة السابقة.

إن مرشح معدّل التحرك moving average filter الذي وصفناه معقدّ نوعا ما، من ناحية أن المخرج في أي لحظة يعتمد على المدخل في كلا اللحظتين الماضية والمستقبلية. ويجب تأخير المخرج إلى حد ما بالنسبة للمدخل كي نتمكن من القيام بهذه الحسابات. وسنتناول وصف مرشحات أبسط، بحيث أن تلك المرشحات يعتمد فيها المخرج على اللحظة الحالية و اللحظة الماضية فقط. إن المواصفات العامة لمرشح رقمي يأخذ بالحسبان هذه اللحظات الزمنية فقط هي:



(1)

إن الأوزان (قيم حروف b في المعادلة) تعرف باسم معاملات ارتباط

المرشح

Coefficients of the filter. وقد جرى ترميزها بحروف صغيرة بالنسبة للزمن

n= 0

وهكذا فإن المعامل الأول هو bo، والثاني الذي يقابل الزمن n - 1 هو b1، وهكذا.

(وسنستخدم هذا التقابل في الترقيم في حساباتنا فيما بعد). وإن تتضمن المرشح إضافة أوزان للنقاط N، يمكن القول بأن المرشح من ترتيب N.

ما هي قيم y_n ، مخرج المرشح، إن كان المدخل يتألف من نبضة واحدة؟ لنفترض أن النبضة المدخلة لها سعة واحدة، وتحدث في زمن نسميّه صفرا. أي أن $x_n = 1$ حينما تكون n صفرا، إلا أن $x_n = 0$ حينما يكون ب n أي قيمة غير الصفر. ويبين الجدول 11 –1 هذا المدخل، وهناك رسم توضيحي له في الشكل 11–4

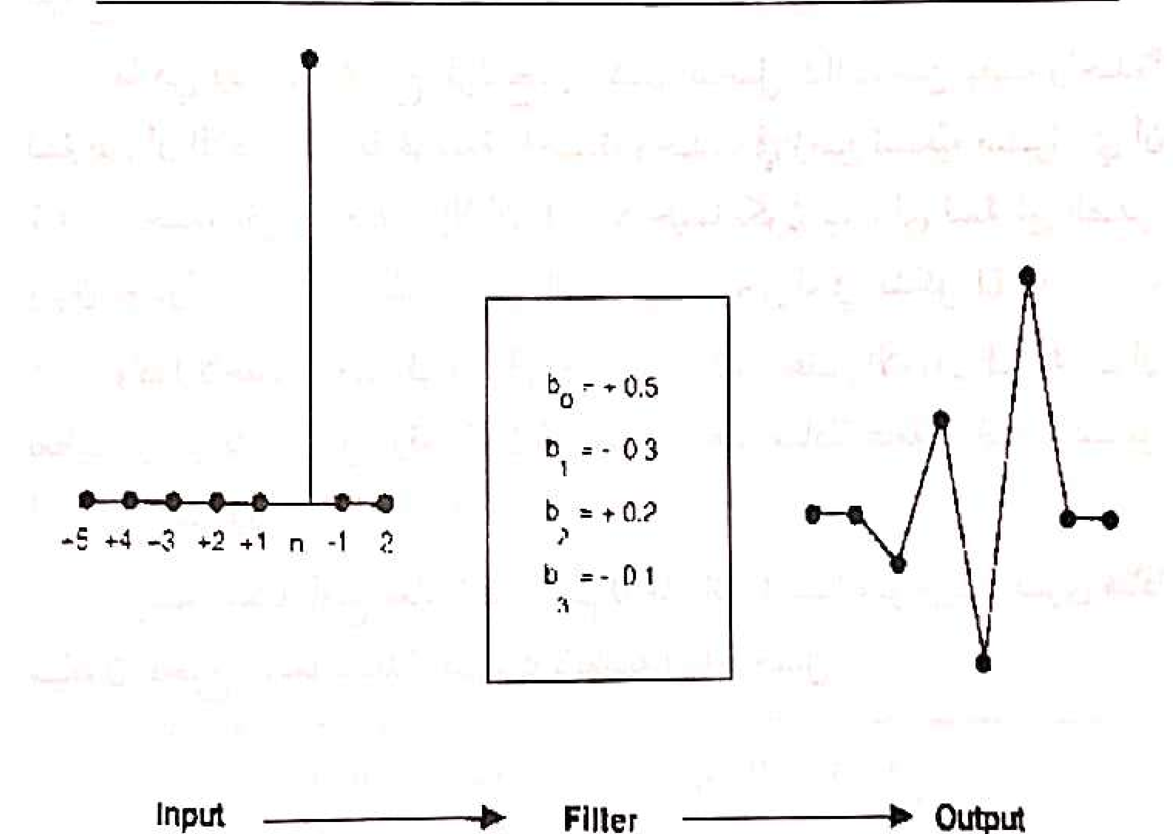
وكما لاحظنا، الحروف b's في معادلة (1) تدل على الأوزان التي يجب أن نعطيها إلى عينات المدخل. وقد يكون لها أي قيم – هذه معادلة عامة. ولجعل النقاش أكثر دقة، سنتناول

مرشحا معينا بأربع معاملات والقيم (العشوائية) كما هو مبيّن. فنرى ماذا سيكون المخرج عندما نستبدل قيم b's بالمعادلة (1) فنحصل :

$$y_n = 0.5x_n - 0.3x_{n-1} + 0.2x_{n-2} - 0.1x_{n-3}.$$

جدول 11-1 تفصيل لمدخل النبضة، مجموعة من أربع معاملات ارتباط، والمخرج

Input		Filter		Output	
Sample Number	Amplitude	Coefficient Number	Value	Sample Number	Amplitude
x_{n-2}	0			y_{n-2}	0.0
x_{n-1}	0			y_{n-1}	0.0
x_n	1	b_0	0.5	y_n	0.5
x_{n+1}	0	b_1	−0.3	y_{n+1}	−0.3
x_{n+2}	0	b_2	0.2	y_{n+2}	0.2
x_{n+3}	0	b_3	−0.1	y_{n+3}	−0.1
x_{n+4}	0			y_{n+4}	0.0
x_{n+5}	0			y_{n+5}	0.0



شكل 11-4 المدخل، و المرشح، و المخرج كما هو محدد في الجدول 11-1.

والآن أنظر ماذا يحدث في أزمنة مختلفة، أي بقيم مختلفة لـ n. من الواضـح إنـه بالنسبة لقيم n التي هي أقل من الصفر (أي لجميع اللحظـات قبـل حـدوث مدخـل النبضة)، لن يكون هناك مخرج، وعليه، فإن تعتبر صفراً. ولكن أنظـر مـاذا يحـدث حينما تكون $n = 0$ (عند الزمن صفر، أي عنـد حـدوث النبضـة). وضـع $n = 0$ في المعادلة، نحصل :

$$y_0 = 0.5x_0 - 0.3x_{-1} + 0.2x_{-2} - 0.1x_{-3}$$

و نحن نعلم أيضـاً أن $x_0 =$ ، $x_{-1} = 0$ ، و $x_{-2} = 0$ و $x_{-3} = 0$ و بتعويـض هـذه القيم في المعادلة سنحصل على:

$$y_0 = 0.5(1) - 0.3(0) + 0.2(0) - 0.1(0).$$
$$y_0 = 0.5$$

والآن أنظر إلى العينة التالية، حينما تكون $n = 1$. وهذه المرة، حتى تعطي نظـرة مختلفة للعملية، سنستبدل قيم n بالمعادلة (1) قبل استبدال قيم b's.وهذا يعطي:

$$y_1 = b_0x_1 + b_1x_{1-1} + b_2x_{1-2} + b_3x_{1-3}$$

و كما في السابق، $x_0 = 1$، و x_n لجميع القيم الأخرى فهي صفر، وعليه:

$$y_1 = b_0 0 + b_1 1 + b_2 0 + b_3 0$$

وعلى هذا النحو، نجد أن $y_2 = b_2 = 0.2$، و $y_3 = b_3 = -0.1$، وهي القيم المبينـة في الرسم التوضيحي البياني 11-4.

إن المعادلة العامة (1) التي بدأنا بها جعلت مخرج المرشح معتمدا علـى المدخـل الحالي وعلى جميع المدخلات الماضية. والآن بيّنا أنه حينما يكون المدخل لمرشح يتـألف من نبضة واحدة بسعة واحدة، فسيكون لعينات المخـرج قيمـاً تقـابل الأوزان. وهـذا يعطينا طريقة واحدة لتحديد خصائص تردد المرشح. نستطيع أن ندخـل نبضـة بسـعة

واحدة (وحدة النبضة)، ونأخذ موجة المخرج (استجابة النبضة التي تعادل معــاملات المرشح)، ونحدد عناصر ترددها. رأينا في الفصل السابق كيف نحسب طيف موجة ما، باستعمال تحليل فورير. وكل ما نحتاج عمله لكي نحدد الخصــائص الطيفيـة لمرشـح رقمي هي أن نحسب تحويل فورير لمعاملات المرشح. وإذا عرفنـا المعــاملات، نسـتطيع حساب الطيف. و لسوء الحظ، ليس من السهل أن نقوم بهذه العمليـة معكوسـة، اي إذا عرفنا طيف المرشح، نستطيع أن نحسب المعاملات.

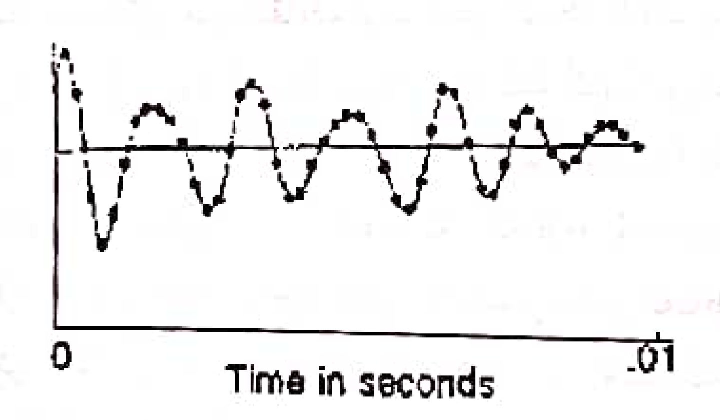
تحليل L P C

Linear Predictive Coding

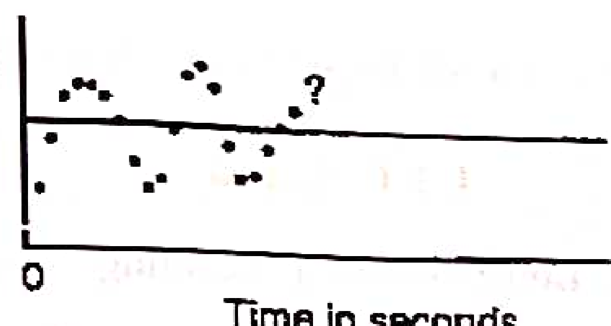
التحويل إلى رموز خطية تنبؤية

كما وضحنا في الشكل 11-1، يتضمن تحليل LCP إيجاد مرشح له منحنى رنيني بحيث يكون مقلوب طيف موجة معينة. وكما رأينا، فإنه يمكن تعريف المرشحات الرقمية وفقاً لمجموعة من المعاملات. و من الممكن أيضاً استعمال مجموعة من المعاملات للتنبؤ بنقطة في موجة عينية من خلال معرفة لقيم عدد من النقاط السابقة(على افتراض أن الموجة ليست عشوائية ولها نمط منتظم يمكن التنبؤ به). تقوم طريقة LPC بتنبؤٍ من هذا النوع عن طريق أخذ عدد من النقاط السابقة وضرب كل واحد منها بمعامل.

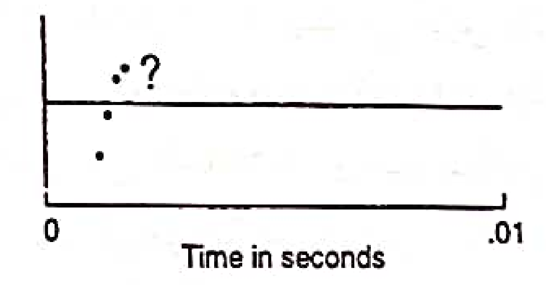
تأمل موجة عينية كتلك الموضحة في شكل 11-5. بصفة عامة، إذا أردنا أن نتنبأ قيمة نقطة معينة، فإننا نسير قدماً بشكل جيد إذا عرفنا قيم عدد كاف من النقاط السابقة. إذا عرفنا عشرين نقطة، كما في الشكل 11-6، نستطيع أن نقدر تقديراً جيداً قيمة النقطة التالية، ولكن إذا عرفنا أربع نقاط فقط، كما في الشكل 11-7، فسيكون عملنا مجرد تخمين.



شكل 11-5 موجة عينية تم وضع عدد من النقاط عليها بالنسبة للزمن



شكل 11-6 عشرون نقطة من موجة عينية تسمح بتنبؤ النقطة التالية بدقة معقولة



شكل 11-7 حينما تعرف أربع نقاط فقط من موجة عينية يصعب التنبؤ بالنقطة التالية

إن المبدأ الرئيسي لطريقة LPC هو أن أي نقطة يمكن اعتبارها ببساطة مجموع عدد من النقاط السابقة، و أن كل نقطة تمّ ضربها في رقم إيجابي أو سلبي مناسب. إن الأرقام المستخدمة في الضرب تسمى معاملات التنبؤ الخطية .Linear Predictor Coefficients لاحظنا من قبل بأننا إذا عرفنا عدداً كافياً من النقاط السابقة في موجة عينية، نستطيع أن نقدر تقديراً جيداً قيمة النقطة التالية. إنه صحيح في كثير من الحالات، إذا عرفنا عدداً أكبر من النقاط، فإننا نقدر النقطة التالية بشكلٍ أدق. ولكن، بالنسبة لبعض الموجات، إن عرفنا أي نقطتين، وعرفنا أنها موجة من نوع معين، نستطيع التنبؤ بقيم جميع النقاط الأخرى. ومن وجهة نظرنا، إن الحالة المهمة من هذا النوع تلك المتعلقة بموجة المنحنى الجيبي المتضائلة Damped Sinusoidal Wave . ويوضح الشكل 11-8 مثل هذه الموجة، والتي تشتمل على نقاط تحدث في فترات منتظمة ممثلة بدوائر ممتلئة. إذا ما عرفنا قيم أي نقطتين من هذه النقاط، نستطيع تحديد قيمة النقطة التالية تماماً. وبعبارة أخرى، نستطيع التنبؤ بقيمة النقطة

y_n، إذا عرفنا قيم النقاط y_{n-1}، و y_{n-2}. إن المعادلة الحقيقية للموجة الموضحة في الشكل 11-8 هي: $y_n = 1.5y_{n-1} - 0.86y_{n-2}$.



شكل 11-8 موجة جيب عينية متضائلة بعدد من النقاط. إذا ما عرفنا قيمة أي نقطتين منها يسهل علينا التنبؤ بجميع النقاط التالية.

يوضح الجدول 11-2 قيم النقاط العشرين الأولى في الشكل 11-8، وبإمكانك أن تدقق ذلك بنفسك. لاحظ مثلاً، أن النقطة الرابعة لها قيمة 43، وهي تساوي ضعف النقطة الثالثة و نصف الضعف (1.5*76 = 114) زائد -0،86 ضعف النقطة الثانية (-0،86*82 = -71، و 114-71 = 43). إن نفس العلاقة صالحة لجميع النقاط.

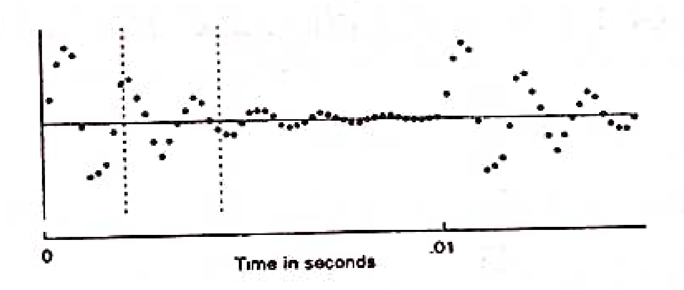
جدول(2،11) قيم النقاط العشرين الأولى في الموجة الموضحة في الشكل11-8

1	54	11	26
2	82	12	38
3	76	13	36
4	43	14	20
5	0	15	0
6	-37	16	-18
7	-56	17	-26
8	-52	18	-24
9	-30	19	-14
10	0	20	0

إن تحليل الكلام باستخدام طريقة LPC يعتمد على الحقيقة التي مفادها بأننا نستطيع أن نتنبأ بجميع النقاط في موجة جيبية من معاملين اثنين. لقد رأينا في الفصل

السابع، أن التوافق هو ببساطة موجة جيبية متضائلة، وأن العديد من أصوات الكلام هي ببساطة مجموع عدد التوافقات تتكرر في فترات تتوافق ونبضات الأوتار الصوتية. بشكل عام، هناك توافق واحد كل 1000 هرتز. (تذكر بأن صائتاً محايداً neutral vowel له توافقات بـ(500، 1.500، 2.500، 3.500، 4.500 هرتز ...وهكذا). إذا كنا نحلل موجة كلام تمّ اختيارها كعينة بتردد 10،000هيرتز ولها ترددات تصل إلى 5،000 هيرتز، فإننا نتوقع وجود خمسة توافقات. وكل واحد من هذه التوافقات يمكن اعتباره موجة جيبية متضائلة بمعاملين اثنين. وعليه، فإننا بحاجة إلى مرشح بعشرة معاملات (على الأقل). (وحقيقة الأمر أننا بحاجة إلى أكثر من ذلك، لحساب عوامل أخرى سنتطرق إليها فيما بعد).

كي تعرف كيف تتم العملية، سنتناول حالة مبسّطة نحلل فيها موجة طبقاً لأربعة معاملات. سنحلل موجة ممثلة بالنقاط العينية في الشكل 11-9، آخذين بعين الاعتبار النقاط الإثنتي عشر في النافذة. (و بالطبع، فإننا نتناول بالبحث نافذة أكبر بكثير، وعدداً أكبر من المعاملات). ونشير إلى النقاط المتتالية في المنافذة بالحروف الصغيرة إلى .ويبين الجدول 11-3 القيم المخصصة لهذه النقاط.



شكل 11-9 موجة مثلث بعدد من النقاط العينية. النقاط الاثنتا عشرة في النافذة

سنشير إليها كمثال في تحليل LPC .

جدول11-3 سعات النقاط الاثنتا عشرة في النافذة في الشكل11-9 (قربت إلي أقرب عدد صحيح) والقيم الموزونة لحدود المعادلات السابقة

n	Amplitude	0.5*(n − 1)	-0.6*(n − 2)	0.4*(n − 2)	0.7*(n − 4)
1	90				
2	50	45.2			
3	17	25.1	−54.2		
4	−42	8.4	−30.3	36.1	
5	−74	−20.9	−10.1	20.2	63.2
6	40	−37.0	25.1	6.8	−35.4
7	−4	20.3	44.4	16.7	−11.8
8	22	−2.2	24.3	−29.6	29.2
9	49	10.9	2.6	16.2	51.8
10	38	24.6	−13.1	−1.8	28.4
11	1	19.1	−29.5	8.7	3.1
12	−17	0.7	−22.9	19.6	15.2

نستطيع التنبؤ بـs_5من القيم الأربع السابقة : s_4, s_3, s_2, s_1ونستطيع القيام بذلك بضرب كل قيمة من هذه القيم بقيم LPC الملائمةa_4, a_3, a_2, a_1 وباتباع تقليد إحصائي معروف حيث تدل ؟ على قيمة مقدرة، تسمّى هذه القيمة التقديرية بـ ؟ ويمكننا القول عندئذ بأن:

$$?_5 = a_1 s_4 + a_2 s_3 + a_3 s_2 + a_4 s_1 \text{.................}(2)$$

ينص المصطلح الأول في الجزء الأيمن من المعادلة بكل بساطة على أننا نضرب قيمة النقطة التي تقع قبلs بثابت لم يتم تحديده بعد a_1 ، ونضرب الحد الذي يقع قبله (s) بثابت آخرa_2 وهكذا. وفي المثال الذي سقناه، طالما أننا نعرف القيم لكل واحدة من هذه النقاط، نستطيع القول :

$$?_5 = -42a_1 + 17a_2 + 50a_3 + 90a_4 \text{................}(3)$$

وفي الحالة العامة لنقطة نسميها s_n نستطيع أن نكتب

$$_n = a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4} \text{...............} (4)$$

حيث تمثل a_4, a_3, a_2, a_1 قيم LPC، و $s_{n-4}, s_{n-3}, s_{n-2}, s_{n-1}$ هي النقاط الأربع السابقة، و المعروف قيمها.

و لنأخذ عدداً قليلاً من حالات أكثر تحديداً، فإننا نرغب في تحديد قيم هذه المعـــامـلات

a_4, a_3, a_2, a_1 التي ستتنبأ بفعالية جيدة كل النقاط المبيّنة، و سيكون من الصحيح أن:

$$s_6 = a_1 s_5 + a_2 s_4 + a_3 s_3 + a_4 s_2 \text{.........................} (5)$$

$$= -74 a_1 - 42 a_2 + 17 a_3 + 50 a_4 .$$

$$s_7 = a_1 s_6 + a_2 s_5 + a_3 s_4 + a_4 s_3$$

$$= -40 a_1 - 74 a_2 - 42 a_3 + 17 a_4 .$$

$$s_8 = a_1 s_7 + a_2 s_6 + a_3 s_5 + a_4 s_4$$

$$= -4 a_1 - 40 a_2 - 74 a_3 - 42 a_4 .$$

$$s_9 = a_1 s_8 + a_2 s_7 + a_3 s_6 + a_4 s_5$$

$$= 22 a_1 - 4 a_2 - 40 a_3 - 74 a_4 .$$

إذا تمّ التنبؤ بكل نقطة على النحو الصحيح، فلن يكون هناك فرق بينهما وبـــين قيمتها التقديرية ونستطيع الكتابة للحالة العامة:

؟ $$0 = S_n - {}_n\hat{S} \text{...............................} (6)$$

نحن نعرف بأن ؟ هي من (3)، لذا نستطيع أن نكتب:

$$0 = s_n - (a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4}) \text{.........} (7)$$

حيث أن مجموعة المصطلحات بين الأقواس تساوي تماما مجموعـة المصطلحـات التي استخدمناها لتقدير قيمة s_n في المعادلة (4). و بالنسبة للنقـاط الـتي درسـناها في (5)، نعرض المجموعات الأربع التالية :

$$
\begin{aligned}
s_6 - s_6 &= 0 \qquad\qquad\qquad (8)\\
&= -40 - (-70a_1 - 42a_2 + 17a_3 + 50a_4)\\
s_7 - s_7 &= 0\\
&= -4 - (-70a_1 - 54a_2 + 16a_3 + 97a_4)\\
s_8 - s_8 &= 0\\
&= 22 - (-40a_1 - 79a_2 - 54a_3 + 16a_4)\\
s_9 - s_9 &= 0\\
&= 49 - (-4a_1 - 59a_2 - 79a_3 - 54a_4).
\end{aligned}
$$

لدينا الآن أربع معادلات بمجاهيل أربعة. بإمكاننا (أو بإمكان برنامج محوسـب) أن يجد حلولا

لهذه المعادلات الآنية وأن يجد قيمها a_4, a_3, a_2, a_1 والتي ستكون مناسبة للنقاط الخمسـة

s_9, s_8, s_7, s_6, s_5.وينتج عن ذلك أن الجواب هو أن: $a_4 = -0.7, a_3 = 0.4, a_2 = -0.6, a_1 = 0.5$

وتبيّن الأعمدة الأربعة الأخيرة في الجدول 11-3 نتائج ضـرب النقـاط السـابقة بهذه القيم، وبإمكانك أن تدقق في هذا الأمر بنفسك. (وفي عمليـات الضـرب هـذه، أضيفت خانات عشرية لم يتم تضمينها في العمود الأول الذي يبين الأرقام المسـتخدمة في رسم الموجة في الشكل 11-9). وعلى سبيل المثال، كما هو موضح في الجدول :

$s_6 - (s_6) = 0 - 40 - (-74a_1$	-74.0* 0.5 =-37.0
$-42a_2$	-41.8*-0.6 =+25.1
$+17a_3$	+16.9* 0.4 = +6.8
$+50a_4$	+50.5*-0.7 =-35.4
	= 40.5

نريد قيماً لمرشح LPC تكون مناسبة ليس لمجموعة الأربع نقاط فحسب بل لأي مجموعة أخرى من أربع نقاط في ذلك الجزء من الموجـة الـتي نحـن بصـدد تحليلـه. إن تحليل المعادلات في (8) يعطينا قيما لـ a_4,a_3,a_2,a_1 مناسبة للنقاط s_9,s_8,s_7,s_6 ، إلا أنها ستعطي خطأ إن استخدمت لتقدير نقطة خامسة من أي مجموعة أخرى تتكون من أربع نقاط. إن الخطأ لأي نقطة s_n سيسمى e_n ، حيث :

$$e_n = \left(\hat{S}_n - s_n\right)^2, \qquad (9)$$

أي أن الخطأ عبارة عـن مربـع الفـرق بـين القيـم التقديريـة والقيـم المعروفـة. (مرفوعة لرقم إيجابي، بصرف النظر ما إذا كانت $_n$ ؟ أكثر أو أقل من s).

نحن ندرس عادة نافذة، أو جزءاً من شكل موجة يتألف مـن عـدد مـن النقـاط المأخوذة كعينة. هناك اثنتا عشرة نقطة في النافذة في شكل 11-9. وبالتالي، هناك ثمـان مجموعات من أربع نقاط يمكن استخدامها لتقدير النقطة الخامسة، كل نقطة بخطـأ مـا، كما هو ممثل في المعادلة (10). (وعند هذه النقطة، يتعين عليك البحـث عـن مجموعـة من المعادلات ككل. انظر إلى السّطر الأول لترى إن كنت ستفهمه، ثم أنعـم النظـر في الأعمدة لترى كيف أن كل خط يختلف عن الخط الذي يعلوه :

$$e_5 = (\ \ _5 - s_5)^2 \qquad ؟ (10)$$

$$= (a_1 s_4 + a_2 s_3 + a_3 s_2 + a_4 s_1 - s_5)^2$$

$$e_6 \underset{?}{=} (\ \ _6 - s_6)^2$$

$$= (a_1 s_5 + a_2 s_4 + a_3 s_3 + a_4 s_2 - s_6)^2$$

$$e_{\underset{?}{7}} = (\ \ _7 - s_7)^2$$

$$= (a_1 s_6 + a_2 s_5 + a_3 s_4 + a_4 s_3 - s_7)^2$$

$$e_8 = (\ \ _8 - s_8)^2$$

$$= (a_1 s_7 + a_2 s_6 + a_3 s_5 + a_4 s_4 - s_8)^2$$

$$e_9 = (\ \ _9 - s_9)^2$$

$$\overset{?}{=} (a_1 s_8 + a_2 s_7 + a_3 s_6 + a_4 s_5 - s_9)^2$$

$$e_{10} = (\ _{10} - s_{10})^2$$

$$= (a_1 s_9 + a_2 s_8 + a_3 s_7 + a_4 s_6 - s_{10})^2$$

$$e_{11} = (\ _{11} - s_{11})^2$$

$$= (a_1 s_{10} + a_2 s_9 + a_3 s_8 + a_4 s_7 - s_{11})^2$$

$$e_{12} = (\ _{12} - s_{12})^2$$

$$= (a_1 s_{11} + a_2 s_{10} + a_3 s_9 + a_4 s_8 - s_{12})^2$$

تحل خوارزمية LPC مجموعات المعادلات المتزامنة للنقاط في النافذة في الوقت الذي تحاول فيه التقليل من مجموع هذه الأخطاء. وتكمن المشكلة في إيجاد قيم معاملات الارتباط بحيث لا يكون لكل منها نصيب في مجموع الأخطاء في النافذة. وكما سترى، إن عملية إيجاد قيم LPC المناسبة عملية طويلة نوعا ما، إلاّ أنها جديرة بالجهد المبذول (أو على الأصح، ليتولى الحاسوب عملها) لأن عوامل الارتباط لها خواصٌ مفيدة جدا. أولاً : إنها طريقة فاعلة لوصف صوت الكلام وفقا لعدد صغير من الأرقام، يمكن استخدام قيم LPC لإعادة بناء شكل الموجة بدرجة معقولة من الدقة. ثانياً : وهو الأهم بالنسبة لعلماء الصوتيات الذين هم في الغالب غير معنيين بالطرق الفعّالة لتخزين أشكال موجات الكلام، إن قيم LPC يمكن أن تخضع للتحليل بذاتها وصفاتها لتقدم لنا قيما تقديرية للترددات التوافقيّة.

إن الرياضيات اللازمة لتقديم حلول لمعادلات LPC مرهقة نوعا ما إلا أنها ليست معقدة. وباستثناء قدر قليل من جبر المدارس الثانوية، (إيجاد التفاضل لعبارات جبرية، و التي ستمثّل بوضوح)، فإن الرياضيات التي سنستخدمها لا تتطلب سوى عمليات حسابية أساسية. وسنبدأ هذه العملية في الفقرات التالية من هذا الفصل بشيء من التفصيل. وبإمكان القارئ المتمكن من الرياضيات أن ينتقل مباشرة إلى الفقرة التالية، حيث سنلخص هذه العملية مستخدمين الرموز الرياضية التقليدية. وإن كنت لا ترغب في معرفة الكيفية التي تعمل بها معادلات LPC، فبإمكانك القفز إلى الفقرة الأخيرة، حيث سندرس استعمال LPC في تحليل الكلام.

سنبدأ بدراسة الشكل العام للخطأ لأي نقطة في النافذة (علما بأننا لا زلنا نفترض أننا نستخدم نقاطا أربعة فقط كمتنبئات للنقطة التالية):

$$e_n = (a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4} - s_n)^2 \quad (11)$$

يمكن إعادة ترتيب حدّي هذه المعادلة كما في (12) حيث نقلت s_n- أخيرة إلى بداية الناحية اليمنى :

$$e_n = (-s_n + a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4})^2 \quad (12)$$

بوضعنا s_n- كحدّ أول يسمح لنا تبسيط العبارة الجبرية أكثر. إذا s_n ضربنا بثابت a_0 نحدده بـ 1-، لن يكون له تأثير سوى مساعدتنا على التخلص من إشارة الناقص، حتى نتمكن من إعادة كتابة (12) كالتالي:

$$e_n = (a_0 s_n + a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4})^2 \quad (13)$$

حيث $a_0 = -1$.

ووفقا لتقدير قيمة نقطة معينة، تكون المعادلة :

$$e_5 = (a_0 s_5 + a_1 s_4 + a_2 s_3 + a_3 s_2 + a_4 s_1)^2 \quad (14)$$

وبهذه الطريقة، نوّحد بين جميع الحدود، وهو أمر في غاية الأهمية حينما نهيئ برنامج حاسوب تتكرر فيه العمليات نفسها مراراً وتكراراً. والخطوة التالية، كي نضرب الحد بين الأقواس في الجهة اليمنى (أي التربيع) يجب أن نضرب كل حد بجميع الحدود الأخرى، حتى نحصل على المعادلة التالية (مرّة أخرى انظر إلى السّطر الأول ثم قارن الحدود في هذا الخط بالحدود في الخطوط التالية) :

(15)

$$\begin{aligned}
e_n = {} & a_0 s_n a_0 s_n + a_0 s_n a_1 s_{n-1} + a_0 s_n a_2 s_{n-2} + a_0 s_n a_3 s_{n-3} + a_0 s_n a_4 s_{n-4} \\
& + a_1 s_{n-1} a_0 s_n + a_1 s_{n-1} a_1 s_{n-1} + a_1 s_{n-1} a_2 s_{n-2} + a_1 s_{n-1} a_3 s_{n-3} + a_1 s_{n-1} a_4 s_{n-4} \\
& + a_2 s_{n-2} a_0 s_n + a_2 s_{n-2} a_1 s_{n-1} + a_2 s_{n-2} a_2 s_{n-2} + a_2 s_{n-2} a_3 s_{n-3} + a_2 s_{n-2} a_4 s_{n-4} \\
& + a_3 s_{n-3} a_0 s_n + a_3 s_{n-3} a_1 s_{n-1} + a_3 s_{n-3} a_2 s_{n-2} + a_3 s_{n-3} a_3 s_{n-3} + a_3 s_{n-3} a_4 s_{n-4} \\
& + a_4 s_{n-4} a_0 s_n + a_4 s_{n-4} a_1 s_{n-1} + a_4 s_{n-4} a_2 s_{n-2} + a_4 s_{n-4} a_3 s_{n-3} + a_4 s_{n-4} a_4 s_{n-4}
\end{aligned}$$

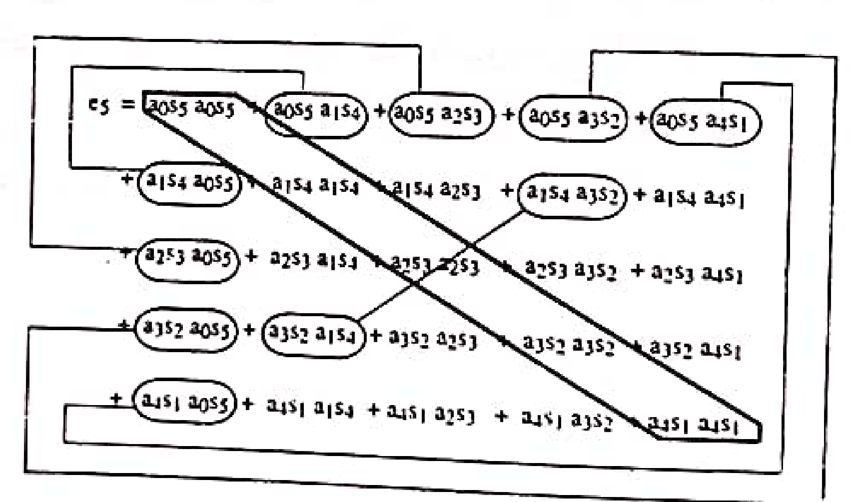
أو إن شئت النظر إلى الشكل الموسّع لنقطة ما، لتكـنs_5، نسـتطيع أن نمثـل (15) كالتالي:

(16)

$$\begin{aligned} e_5 &= a_0s_5a_0s_5 + a_0s_5a_1s_4 + a_0s_5a_2s_3 + a_0s_5a_3s_2 + a_0s_5a_4s_1 \\ &+ a_1s_4a_0s_5 + a_1s_4a_1s_4 + a_1s_4a_2s_3 + a_1s_4a_3s_2 + a_1s_4a_4s_1 \\ &+ a_2s_3a_0s_5 + a_2s_3a_1s_4 + a_2s_3a_2s_3 + a_2s_3a_3s_2 + a_2s_3a_4s_1 \\ &+ a_3s_2a_0s_5 + a_3s_2a_1s_4 + a_3s_2a_2s_3 + a_3s_2a_3s_2 + a_3s_2a_4s_1 \\ &+ a_4s_1a_0s_5 + a_4s_1a_1s_4 + a_4s_1a_2s_3 + a_4s_1a_3s_2 + a_4s_1a_4s_1 \end{aligned}$$

من المهم أن ننظر للمعادلات بأهمية، ملاحظـين أن ترتيـب الحـدود في عملية الضرب هو ترتيب غير متوافق، لذا فإنه باستطاعتنا أن نعيد كتابـة $a_0s_5a_0s_5$ ، مثـلاً، لتكون $a_0a_0s_5s_5$،أو

$a_0{}^2s_5{}^2$. عندما نفعل ذلك، نرى بأن الحدود التي تمثـل التربيعـات لكـل حـد مـن الحدود الأصلية مثل$(a_0s_n)(a_0s_n)$ تقع على القطر، كما هـو مبـين في الشـكل11-10. و لاحظ أيضاً أن كل حد في أعلى اليمين مـن المصفوفـة يقابلـه حـدّ في أسـفل اليسـار منها.(يظهر في الشكل 11-10 جزء من هذه الحدود المتقابلة فقط)



شكل 11-10 جانب من حدود المصفوفة المستعملة في معادلة LPC مرتبة كما هو في (26) مع ملاحظة الحدود التربيعية في المستطيل. وبعض الحدود تحتوي على نفس المضمون ولكن بترتيب مختلف وقد تم الوصل بينها بخطوط.

والآن لا نريد أن ننظر إلى الخطأ لنقطة واحدة بل لكل نقطة من نقـاط النـافذة. إن اعتبرنا

$n = 1,2,\ldots 8$ في المعادلة (15)، لنحصل على معادلة للخطأ الكلـي في النـافذة، نسميّه E_{ϖ}

هذه المعادلة هي مجموع لحـدود الخطـأ في (10) ولكـن باسـتعمال a_0كمـا هـو موضح في (13).

$$
\begin{aligned}
E_{\varpi} &= (a_0 s_5 + a_1 s_4 + a_2 s_3 + a_3 s_2 + a_4 s_1)^2 \quad (18) \\
&+ (a_0 s_6 + a_1 s_5 + a_2 s_4 + a_3 s_3 + a_4 s_2)^2 \\
&+ (a_0 s_7 + a_1 s_6 + a_2 s_5 + a_3 s_4 + a_4 s_3)^2 \\
&+ (a_0 s_8 + a_1 s_7 + a_2 s_6 + a_3 s_5 + a_4 s_4)^2 \\
&+ (a_0 s_9 + a_1 s_8 + a_2 s_7 + a_3 s_6 + a_4 s_5)^2 \\
&+ (a_0 s_{10} + a_1 s_9 + a_2 s_8 + a_3 s_7 + a_4 s_6)^2 \\
&+ (a_0 s_{11} + a_1 s_{10} + a_2 s_9 + a_3 s_8 + a_4 s_7)^2 \\
&+ (a_0 s_{12} + a_1 s_{11} + a_2 s_{10} + a_3 s_9 + a_4 s_8)^2
\end{aligned}
$$

وبتوسيع هذا بتربيع كل خط في (18)، نحصل على مجموعــة مـن خمسة سـطور تقابل كل خط من خطوط (18). إن هذا التعبير مريع، إلا أنــه عندمـا ننظـر إلى الخـط الأول في كل مجموعة، ثم إلى المجموعة ككل، وأخــيراً عندمـا نقـارن بـين المجموعـات، سترى كيف رتبت. فالمجموعة الأولى كالمجموعة في (16)

(19)

$$
\begin{aligned}
e_{\varpi} = {} & a_0s_5a_0s_5 + a_0s_5a_1s_4 + a_0s_5a_2s_3 + a_0s_5a_3s_2 + a_0s_5a_4s_1 \\
& + a_1s_4a_0s_5 + a_1s_4a_1s_4 + a_1s_4a_2s_3 + a_1s_4a_3s_2 + a_1s_4a_4s_1 \\
& + a_2s_3a_0s_5 + a_2s_3a_1s_4 + a_2s_3a_2s_3 + a_2s_3a_3s_2 + a_2s_3a_4s_1 \\
& + a_{31}s_2a_0s_5 + a_3s_2a_1s_4 + a_3s_2a_2s_3 + a_3s_2a_3s_2 + a_3s_2a_4s_1 \\
& + a_4s_1a_0s_5 + a_4s_1a_1s_4 + a_4s_1a_2s_3 + a_4s_1a_3s_2 + a_4s_1a_4s_1
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
& + a_0s_6a_0s_6 + a_0s_6a_1s_5 + a_0s_6a_2s_4 + a_0s_6a_3s_3 + a_0s_6a_4s_2 \\
& + a_1s_5a_0s_6 + a_1s_5a_1s_5 + a_1s_5a_2s_4 + a_1s_5a_3s_3 + a_1s_5a_4s_2 \\
& + a_2s_4a_0s_6 + a_2s_4a_1s_5 + a_2s_4a_2s_4 + a_2s_4a_3s_3 + a_2s_4a_4s_2 \\
& + a_3s_3a_0s_6 + a_3s_3a_1s_5 + a_3s_3a_2s_4 + a_3s_3a_3s_3 + a_3s_3a_4s_2 \\
& + a_4s_2a_0s_6 + a_4s_2a_1s_5 + a_4s_2a_2s_4 + a_4s_2a_3s_3 + a_4s_2a_4s_2
\end{aligned}
$$

+ etc : to

$$
\begin{aligned}
& + a_0s_{12}a_0s_{12} + a_0s_{12}a_1s_{11} + a_0s_{12}a_2s_{10} + a_0s_{12}a_3s_9 + a_0s_{12}a_4s_8 \\
& + a_1s_{11}a_0s_{12} + a_1s_{11}a_1s_{11} + a_1s_{11}a_2s_{10} + a_1s_{11}a_3s_9 + a_1s_{11}a_4s_8 \\
& + a_2s_{10}a_0s_{12} + a_2s_{10}a_1s_{11} + a_2s_{10}a_2s_{10} + a_2s_{10}a_3s_9 + a_2s_{10}a_4s_8 \\
& + a_3s_9a_0s_{12} + a_3s_9a_1s_{11} + a_3s_9a_2s_{10} + a_3s_9a_3s_9 + a_3s_9a_4s_8 \\
& + a_4s_8a_0s_{12} + a_4s_8a_1s_{11} + a_4s_8a_2s_{10} + a_4s_8a_3s_9 + a_4s_8a_4s_8
\end{aligned}
$$

إن مشكلتنا محصورة في أن تسـهم الحدود a_4, a_3, a_2, a_1 بأقل قدر ممكن من الخطأ. والخطوة التالية هي إعادة ترتيب المعادلات لتجميع جميع الحدود التي تحتوي على a_1 وجميع المعادلات التي تحتوي على a_2 الخ. (ولا حاجة لنا أن نفعل أي شيء بالنسبة لـ a_0 لأننا نعرف بأنها 1-).إن مجموعة الحدود لـ a_1 هي كما تظهر في الشكل 11-11.

لاحظ أنه يوجد ثماني حدود من شكل $a_1{}^2s_n{}^2$ (على سبيل المثال، $a_1a_1s_5s_5$ و $a_1a_1s_6s_6$)، واحدة في كل جزء من أجزاء المصفوفة. يمكننا أن نأخذ جميع هذه الحدود ونكتبها كالتالي :

(20)

$$
a_1{}^2(s_5{}^2 + s_6{}^2 + s_7{}^2 + s_8{}^2 + s_9{}^2 + s_{10}{}^2 + s_{11}{}^2 + s_{12}{}^2).
$$

نحن نعرف قيم حدود s، وعليه، فإننا نستطيع كتابتها كـــ a_1^2(قيـم معروفـة). و النسبة للموجة

في الشكل 11-9 والقيم في الجدول 11-3 :

$$s_5^{\ 2} + s_6^{\ 2} + s_7^{\ 2} + s_8^{\ 2} + s_9^{\ 2} + s_{10}^{\ 2} + s_{11}^{\ 2} + s_{12}^{\ 2}$$

$$= 74*74+40*40+4*4+22*22+49*49+38*38+1*1+17*17$$

$$= 11,711.$$

$= a_0 s_5 a_0 s_5$	$+ a_0 s_5 a_1 s_4$	$+ a_0 s_5 a_2 s_3$	$+ a_0 s_5 a_3 s_2$	$+ a_0 s_5 a_4 s_1$
$+ a_1 s_4 a_0 s_5$	$+ a_1 s_4 a_1 s_4$	$+ a_1 s_4 a_2 s_3$	$+ a_1 s_4 a_3 s_2$	$+ a_1 s_4 a_4 s_1$
$+ a_2 s_3 a_0 s_5$	$+ a_2 s_3 a_1 s_4$	$+ a_2 s_3 a_2 s_3$	$+ a_2 s_3 a_3 s_2$	$+ a_2 s_3 a_4 s_1$
$+ a_3 s_2 a_0 s_5$	$+ a_3 s_2 a_1 s_4$	$+ a_3 s_2 a_2 s_3$	$+ a_3 s_2 a_3 s_2$	$+ a_3 s_2 a_4 s_1$
$+ a_4 s_1 a_0 s_5$	$+ a_4 s_1 a_1 s_4$	$+ a_4 s_1 a_2 s_3$	$+ a_4 s_1 a_3 s_2$	$+ a_4 s_1 a_4 s_1$
$+ a_0 s_6 a_0 s_6$	$+ a_0 s_6 a_1 s_5$	$+ a_0 s_6 a_2 s_4$	$+ a_0 s_6 a_3 s_3$	$+ a_0 s_6 a_4 s_2$
$+ a_1 s_5 a_0 s_6$	$+ a_1 s_5 a_1 s_5$	$+ a_1 s_5 a_2 s_4$	$+ a_1 s_5 a_3 s_3$	$+ a_1 s_5 a_4 s_2$
$+ a_2 s_4 a_0 s_5$	$+ a_2 s_4 a_1 s_5$	$+ a_2 s_4 a_2 s_4$	$+ a_2 s_4 a_3 s_3$	$+ a_2 s_4 a_4 s_2$
$+ a_3 s_3 a_0 s_6$	$+ a_3 s_3 a_1 s_5$	$+ a_3 s_3 a_2 s_4$	$+ a_3 s_3 a_3 s_3$	$+ a_3 s_3 a_4 s_2$
$+ a_4 s_2 a_0 s_6$	$+ a_4 s_2 a_1 s_5$	$+ a_4 s_2 a_2 s_4$	$+ a_4 s_2 a_3 s_3$	$+ a_4 s_2 a_4 s_2$
+ etc. 10				
$+ a_0 s_{12} a_0 s_{12}$	$+ a_0 s_{12} a_1 s_{11}$	$+ a_0 s_{12} a_2 s_{10}$	$+ a_0 s_{12} a_3 s_9$	$+ a_0 s_{12} a_4 s_8$
$+ a_1 s_{11} a_0 s_{12}$	$+ a_1 s_{11} a_1 s_{11}$	$+ a_1 s_{11} a_2 s_{10}$	$+ a_1 s_{11} a_3 s_9$	$+ a_1 s_{11} a_4 s_8$
$+ a_2 s_{10} a_0 s_{12}$	$+ a_2 s_{10} a_1 s_{11}$	$+ a_2 s_{10} a_2 s_{10}$	$+ a_2 s_{10} a_3 s_9$	$+ a_2 s_{10} a_4 s_8$
$+ a_3 s_9 a_0 s_{12}$	$+ a_3 s_9 a_1 s_{11}$	$+ a_3 s_9 a_2 s_{10}$	$+ a_3 s_9 a_3 s_9$	$+ a_3 s_9 a_4 s_8$
$+ a_4 s_8 a_0 s_{12}$	$+ a_4 s_8 a_1 s_{11}$	$+ a_4 s_8 a_2 s_{10}$	$+ a_4 s_8 a_3 s_9$	$+ a_4 s_8 a_4 s_8$

شكل 11-11 رسم بياني لثلاث معادلات تربيعية توضح قيم y عندما تصل إلي أدنى حدّ.

وينطبق هذا على $a_2^{\ 2}, a_3^{\ 2}, a_4^{\ 2}$.

وبدراسة الحدود المشتملة على a_1 فقط، يتبين لنا أن هناك مثالين لكل من الحدود الأخرى في النمط، مترابطة كما هو في الشكل 11-11، ويمكن تلخيصها كالتالي:

(21)

$$\begin{aligned}
&2a_1a_0(s_4s_5 + s_5s_6 + s_6s_7 + s_7s_8 + s_8s_9 + s_9s_{10} + s_{10}s_{11} + s_{11}s_{12}) \\
&+2a_1a_2(s_4s_5 + s_5s_6 + s_6s_7 + s_7s_8 + s_8s_9 + s_9s_{10} + s_{10}s_{11} + s_{11}s_{12}) \\
&+2a_1a_3(s_4s_5 + s_5s_6 + s_6s_7 + s_7s_8 + s_8s_9 + s_9s_{10} + s_{10}s_{11} + s_{11}s_{12}) \\
&+2a_1a_4(s_4s_5 + s_5s_6 + s_6s_7 + s_7s_8 + s_8s_9 + s_9s_{10} + s_{10}s_{11} + s_{11}s_{12})
\end{aligned}$$

وبالنسبة للموجة في الشكل 11-9 والقيم في الجدول 11-3، فإن القيم :

$$s_4s_5 + s_5s_6 + s_6s_7 + s_7s_8 + s_8s_9 + s_9s_{10} + s_{10}s_{11} + s_{11}s_{12}$$

تساوي:

(-42*-74) + (-74*-40) + (-40*-4) + (-4*22) + (22*49) + (49*38) + (38*1) + (1*-17)

وتبلغ 9،101. وبالتالي، إذا لاحظنا أن 9, 101 * 2 = 18,202 وإذا تذكرنا أن a_0 ثبتت إلى -1، نستطيع إعادة كتابة الحدود في (21) كالتالي :

$$-2a_1 + 18.202a_1a_2 + 18.202a_1a_3 + 18.202a_1a_4. \qquad (22)$$

كما لاحظنا من قبل، نريد أن نجد قيمة لـ a_1 ، بحيث تسهم بأقل قدر ممكن من الخطأ الإجمالي. هذا الخطأ يعتمد مباشرة على الحدود في (20) و (21). وبالنسبة للحالة الخاصة التي ندرسها، يمكن إضافة هذين الحدين لبعضهما، كي نكتب :

(23)

$$\texttt{error}a_1 = 11.711a_1^2 - 2a_1 + 18.202a_1a_2 + 18.202a_1a_3 + 18.202a_1a_4$$

وبتعبير كهذا، هذه الحدود لها الشكل العام لمعادلة تربيعية

$$y = mx^2 + nx \qquad (24)$$

إن الدالات من هذا النـوع تتخـذ شـكلا كمـا هـو في الشـكل 11-12، الـذي يوضح ثلاث معادلات تربيعية.

تتخذ جميع المعادلات التربيعيّة (23) وكذلك (24) هـذا الشـكل العـام. وكمـا ترى من الرسومات، فإنها تعني بـأن هنـاك قيمـة مـا ل X علـى الـدوام (أو بالنسبة للحالة قيد الدرس،a_1) بحيث أنه عندما نحدث تغييرا بسيطا في قيمتـها،y (أو خطـأ a_1) يتوقف عن التناقص ويبدأ في الازدياد. وهذه هي القيمة التي نريد إيجادها.

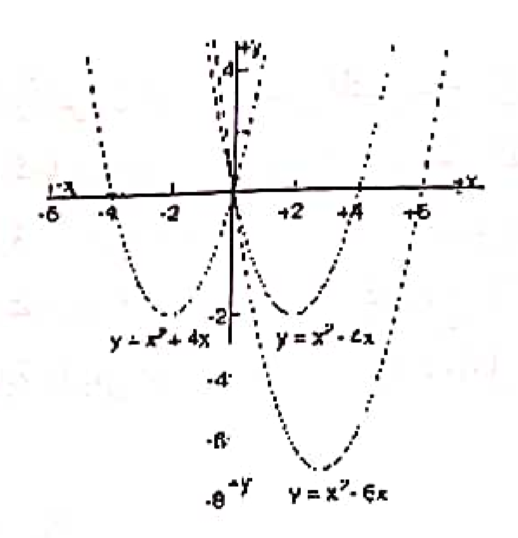
إن القيم الدنيا للمعادلات في الشكل 11-12 مبينة في الجدول التـالي. ويحتـوي هذا الجدول أيضا على عمود يشير إلى كيف يمكــن إيجـاد القيمـة الدنيـا لــ x بعمليـة تعرف بالتفـاضـــل، والتي تبين ميل المنحنى. عندما يكون ميل المنحنــى صفـرا، فـهو مستوي. الصيغة العامة لتفاضل معادلة تربيعيــة مـن هـذا النـوع واضحـة في الصـف الأخير من الجدول :

Equation	Differentiate and Set to Zero	Minimum Value of X	Minimum Value of Y
$y = x^2 + 4x$	$2x + 4 = 0$	$x = -2$	$y = -4$
$y = x^2 - 4x$	$2x - 4 = 0$	$x = 2$	$y = -4$
$y = x^2 - 6x$	$2x - 6 = 0$	$x = 3$	$y = -9$
$y = x^2 + kx$	$2x + k = 0$	$x = -(k/2)$	$y = -(k^2/4)$

والآن يمكن أن نرى كيف بالإمكان أن نحدد القيمـة الدنيـا لــ a، والـتي تنطبـق على هذه المجموعة من النقاط الاثنتي عشر. ولإيجاد الحد الأدنى لمنحنى الخطأ (النقطة التي يكون عندها ميل هذا المنحنى يساوي صفراً)، نفاضل التعبير في (23) و نســاويه بالصفر. وعندئذ نحصل :

(25)

$$0 = 23.422a_1 - 2 + 18.202a_2 + 18.202a_3 + 18.202a_4.$$



شكل 11-12 رسوم بيانية لثلاث معادلات تربيعية موضحة قيم y في حدودها الدنيا

نستطيع صياغة معادلات مشابهة للحد الأدنى للخطأ الذي يعزى إلى كل من a_4,a_3,a_2 ويعطينا هذا أربع معادلات بأربعة مجاهيل a_4,a_3,a_2,a_1 و التي يمكن حلها في آن واحد باستخدام الجبر البسيط. وكما رأينا، باستخدامنا الحاسوب للقيام بكل هذه اللخبطة المعقدة للحدود، نستخلص أن $a_4=-0.7, a_3=0.4, a_2=-0.6, a_1=0.5$. وفي الجزء القادم سنقدم عرضا عاما لهذه العملية. وفي الجزء الأخير سوف نعرض كيف يمكن استثمار هذه الطريقة في تحليل الكلام.

نبذة على LPC

لقد عرضنا طريقة لأخذ نافذة من عدد معين من النقاط (اثنتا عشرة نقطة بالنسبة للحالة التي نحن بصدد بحثها، إلا أن الطريقة يمكن أن تستخدم لأي عدد من النقاط)، ثم نأخذ جزء من هذه النقاط (أربعة في حالتنا)، ونحدد بأقل احتمال ممكن للخطأ قيمة النقطة التالية في النافذة عن طريق ضرب كل نقطة من الجزء المأخوذ بعامل ما. وتحدد هذه الطريقة مرشحا، إذا ما أعطي مدخلا يتألف من موجة كلام، سينتج حدا أدنى للمخرج. $s_{n-1}, s_{n-2}, \ldots, s_{n-p}$

يصف المهندسون وآخرون غيرهم مـن المتمرسـين في الرياضيـات تحليـل LPC بعبارات مختلفة نوعا ما، كما سنفعل الآن. إن صلب هذه الطريقة أن تتنبأ السعة لـ n مـن العينـات في الإشـارة . و نقـوم بذلـك بـأخذ مجمـوع p مـن النقـاط السـابقة، $S_{n-p},...,S_{n-2},S_{n-1}$ والتي باستخدام كلٍ من s و رمز المجمـوع Σ للتعبيـر عـن مجمـوع كـل الحدود، فإننا نستطيع كتابة ما يلي: سيضرب كل منها بمعامل ،حيث k تأخذ قيماً من 1 إلى p. و

$$S_n = \sum_{k=1}^{p} a_k s_{n-k} \quad (26)$$

و بالكلمات، هذه المعادلة تقول أن القيمة المقدرة لسعة النقطة s تساوي مجموع p من النقاط السابقة، حيث أن كل نقطة سابقة s_{n-k} تم ضربها بمعامل معـين a_k. و هـذا مكافئ لـ (4) في الشرح السابق. إن الفرق بين التنبؤ و القيمة الحقيقية يمثـل الخطأ، و كما في السابق، فإننا سوف نحسب هذا الخطأ e_n بتربيع هذا الفرق كما فعلنا في (9):

$$e_n = (\ _n - s_n)^2 \qquad (27)$$

و بتعويض قيمة $_n$ الناتجة من (26) في المعادلة (27) سنحصل على:

$$e_n = \left(\sum_{k=1}^{p} a_k s_{n-k} - s_n \right)^2 \qquad (28)$$

و ننظر للخطأ لكل نقطة في النافذة، و التي سنقول أنـها نـافذة بطـول w مـن النقاط. و بما أننا نحتاج إلى p من النقاط للقيام بكـل تنبـؤ، فإننـا سنحسـب الخطأ لـ (w-p) من النقاط. و الآن لتكن E تشير إلى مجموع كل حدود الخطـأ e_n (حيـث أن n تأخذ قيماً من 1 إلى w-p). عندها نكتب:

$$E = \sum_{n=1}^{w-p} e_n. \qquad (29)$$

$$E = \sum_{n=1}^{w-p} \left(\sum_{k=1}^{p} a_k s_{n-k} - s_n \right)^2 \qquad (30)$$

و يمكن اختصار E بمفاضلتها جزئياً بالنسبة لكل معامل (a) كالتالي:

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0. \qquad 1 \leq i \leq p \qquad (31)$$

وهذا يمكننا من الحصول على مجموعة من المعادلات:

$$\sum_{k=1}^{p} a_k \sum_{n=1}^{w-p} s_{n-k} - s_{n-i} = \sum_{n=1}^{w-p} s_n - s_{n-1}. \quad 1 \leq i \leq p \qquad (32)$$

إن المعادلة (32) هي مجموعة من p من المعادلات بعدد p من المجاهيل و التي يمكن أن تُحل لمعاملات المتنبئ $\{a_k \,, 1 \leq i \leq p\}$ و التي اختصرت E في (30).

تفسير LPC

مهتمنا التالية تتركز على كيف نستطيع أن نستخلص معلومات من تحليل LPC. إن أقصر السبل إلى ذلك أن ننظر للمعاملات كمحددة لمرشح ما بالمعادلة العامة التالية

$$y_n = b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2} + b_3 x_{n-3}, \ldots \qquad (1)$$

وهي المعادلة التي استُخدمت في حساب LPC. رأينا في بداية هذا الفصل ماذا يحدث عندما يكون المدخل إلى المرشح يتألف من نبضة واحدة. حيث أن المخرج سيتحدد بالمعاملات. إذا عرفنا شكل الموجة، فإننا نستطيع حساب طيفها. وبعبارة أخرى، إذا وضعنا مدخلاً، وهو معادل لوضع عددا لا نهائياً من العناصر بسعة

متساوية، فستتمكن من ملاحظة السعات التقريبية للعناصر في المخـــرج، وبذلــك يتم تحديد طيف المرشح. إن كل ما يجب أن نفعله من أجل تحديــد الطيـف أن نعتبر قيم LPC كمحددات للمرشح. عندئذ ستتمكن من وضع نبضة في المرشح، وإجراء تحليل فورير لموجة المخرج.

ذكرنا في الفصل السابق أن عدد مكونات التردد التي يتم تحديدها بوساطة تحليل فورير يعتمد على المعدل العيني(الذي سنعتبره ثابتا في هذا الشرح) ويعتمد أيضاً على عدد العينات في نافذة FFT. إن كان لدينا عدد كبير من العينات سيترتب علـى ذلـك وجود عدد كبير من المكونات ضمن نطاق التردد المعرف بالمعدل العيـني. (تذكـر بانـه بمعدل عيني 10,000 هيرتز يتم تعريف تردد بمدى 5،000 هرتز، إذا كان طول النـافذة 256 نقطة، سيكون لدينا 128 مكون للتردد في الفترات 39 هرتز، ولكن إذا كان طـول النافذة 512 نقطة، سـيكون لدينـا 256 مكـون للـتردد في الفـترات 19 هرتـز). وكما سنرى، فإن تحليل LPC النموذجي يمتلك 12 أو 14 معامل. إننا نعتبر هـذه المعـاملات محددة لاستجابة نبضة تضمحل إلى الصفر، ولهذا فإننا نستطيع إضافـة أي عـدد نريـده من الأصفار إلى هذه الموجة قبل إجراء FFT. إذا أضفنا FFT أصفاراً كافية في النهايـة، سوف نحصل على طيف بعدد كبير من المكونات، وبذلك نحصل على منحنـى سلس يمثل الاستجابة لمرشح LPC.

عند هذه النقطة يجب أن نتذكر أن مرشح LPC، يجمع نواحي متعددة من إنتاج الكـلام، كمـا شـاهدنا في الشـكل 11-11 إن طيـف LPC لا يقتصـــر علــى تمثيـل التوافقيات الناتجة عن النغمـات المتجاوبـة للقنـاة الصوتيـة بـل يمثـل أيضـا تأثـيرات الإشعاع الشفوي وكذلك طيف النبضة من الأوتار الصوتية. ومع ذلــك، فـإن قمـم LPCتعتبر مؤشرات جيدة على ترددات التوافقيات. وتنشأ مشكلات عندمـا يقـترب أحد التوافقيات من الآخر، الأمر الذي قد يؤدي إلى أن يظــهر الطيـف بقمـة واحـدة مطابقاً لكليهما، أو عندما يكون لتوافق سعة أقـل، الأمـر الـذي قـد يـؤدي أن تظهـر كفتلة خيط في المنحنى ممثلة لتوافق آخر. هذه المشكلات تدفعنـا إلى النظـر إلى تحليـل LPCبطريقة أخرى.

من الممكن أيضاً أن نحلل عبارات LPC الجبرية لتحديد الترددات المطابقة بالضبط للأقطاب(والتي، على كل حال، قد لا تكون تلك التابعة للتوافقيات في القناة الصوتية). لكل زوج من حدود LPC نحصل على زوج من الأرقام مطابقاً للتردد وسعة نطاق قطب في المرشح. نحن نعلم من شرحنا في الفصل العاشر بانه سيكون هنالك توافق 500 هرتز، 1500 هرتز و2500 هرتز في صائت محايد لمتحدث له قناة صوتية طولها 5ر17سم. وبشكل عام، سيكون لهذا المتحدث توافق لكل فترة 1000 هرتز. وعليه، بمعدل عيني 000ر10 هرتز وبحد أقصى للتردد مقداره 5000 هرتز، نتوقع أن نجد خمس توافقيات. ويتطلب هذا عشرة حدود في LPC. وإذا أردنا السماح بحدين آخرين للترددات العليا التي قد يكون لها تأثير على الطيف أو القطب بسبب شكل النبضة المزمارية، يتعين علينا عندئذ أن نقوم بتحليل LPC ذي اثنتي عشرة نقطة.

وإذا كان للمتحدث قناة صوتية أقصر بحيث نتوقع حدوث أربع توافقيات دون 000ر10 هرتز، عندئذ نستخدم LPC ذي العشرة نقاط. إن اختيار العدد الصحيح من معاملات LPC هو فن نوعا ما. إذا اختار أحدهم عدداً كبيراً، سينتج التحليل أقطاباً تطابق ليست من إنتاجه، وبالمقابل، إن كان العدد قليل جداً، فإن التوافقيات ستتكتّل لأن التوافقيات العليا أو النبضة المزمارية قد تتطلب تحديداً أكثر تعقيداً. وتزداد المشكلة تعقيداً بالحقيقة التي مفادها بأن تحليل LPC يعادل المحاولة لرسم طيف باستخدام الأقطاب فقط، وقد يكون هنالك أصفاراً (مضاد للرنين) في القناة الصوتية. وبالتأكيد، سيكون هنالك (مضاد للرنين) في أي شكل من أشكال القناة الصوتية ويحتوي على ما يقابل أنبوباً جانبياً، مثل تجويف الفم بالنسبة للصوت الأنفي. إن تحليل LPC لا يعتمد عليه في تحليل الصوائت الأنفية. إن القاعدة العامة لعدد معاملات هي المعدل العيني في kHz+2، مثال ذلك، 10,000 = 10 kHz + 2 = 12.

إلا أن قاعدة أفضل هي أن نستخدم عدة تحاليل مختلفة بعدد مختلف من معاملات، لترى من منها يؤدي إلى أفضل النتائج.

ونقطة أخيرة يجب أن نتناولها تلك التي تتعلق بحد الخطأ في مخرج LPC. لاحظنا فيما تقدم أننا إذا أخذنا مجموعة منفردة من p من النقاط، نستطيع أن نجد مجموعة من

p من المعاملات، والتي يمكن استخدامها لتحديد القيمة الصحيحة للنقطة التالية. ونشأت المشكلة عندما أردنا استعمال معاملات الارتباط ذاتها لتحديد النقطة التالية لمجموعة مختلفة من النقاط في النافذة. إن عملية LPC تجد أفضل مجموعة من المعاملات التي تقلل الخطأ لكل مجموعة من النقاط في النافذة. وفي هذه الأحوال، فإن كل تحديد له بعض الخطأ، وسيبلغ الخطأ أقصى درجاته عندما يحدث تغيير كبير في جزء من أجزاء الموجة التي بداخل النافذة. ويوضح الشكل 11-3 هذا الأمر جيداً عن طريق إظهار الخطأ مرتبطاً بالتنبؤ الخاص بكل نقطة عند استعمال أربعة عشر معامل في طريقة LPC المطبقة على موجة كلام حقيقية. ويعرف هذا الخطأ بـ LPC residual.

يبلغ الخطأ حده الأقصى حول هذه النقاط التي تحدث حينما تتغير الموجة فجأة بسبب نبضات من اهتزازات الأوتار الصوتية. وينتج عن ذلك أن LPC residual يقدم لنا وسيلة جيدة لتحديد درجة صوت الإشارة. فنستطيع أن نأخذ LPC residual وأن نحسب دالة الارتباط الذاتي، كما فعلنا في الفصل التاسع، إلا أننا في هذه المرة سوف نجد أن هناك قمة كبيرة واحدة في دالة معامل الارتباط الذاتي، وهذه القمة تطابق الفترة بين نبضات الأوتار الصوتية. وبالنسبة لتحليل LPC، حتى الأخطاء مفيدة.

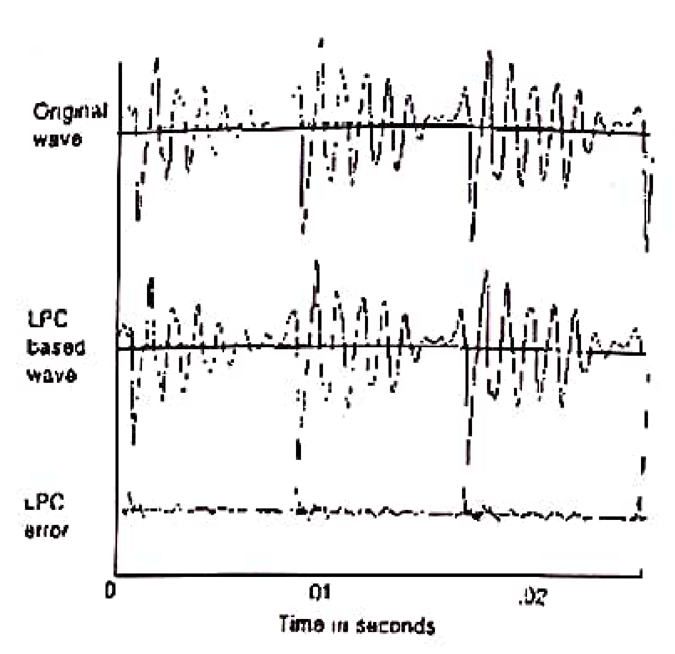


Fig. 11.13. An input wave, the wave calculated from the LPC, and the LPC residual, the difference between these two waves. The equation used for calculating each point is: $y_n = -1.87554 * y_{n-1} + 1.27243 * y_{n-2} - 0.18456 * y_{n-3} - 0.18403 * y_{n-4} + 0.06146 * y_{n-5} + 0.01238 * y_{n-6} + 0.04827 * y_{n-7} - 0.01642 * y_{n-8} - 0.04343 * y_{n-9} + 0.05991 * y_{n-10} + 0.06162 * y_{n-11} + 0.06531 * y_{n-12} - 0.12318 * y_{n-13} - 0.01060 * y_{n-14}$.

إن LPC و FFT ودالات الارتباط الذاتي ما هي إلا عدد قليل من الأساليب المفيدة في تحليل الكلام. ومعظم هذه شرحناها هنا. وبالإضافة إلى ذلك، فإن جميع الفروق الصوتية (الاكوستيكية) بين أصوات الكلام يمكن وصفها وفقاً للمبادئ العامة التي قدمنا لها تلخيصاً في هذا الكتاب.

إن معرفة هذه المبادئ وألفة بالأساليب الحاسوبية التي عرضناها في الفصول السابقة ستمكن القارئ من الاطلاع على المشكلات التي يجري بحثها في أوراق بحث معاصرة عن الصوتيات.

عناصر

صوتيات موجات الكلام

